



HELSINGIN YLIOPISTO

MAATALOUS-METSÄTIETEELINEN TIEDEKUNTA

METSÄTIETEIDEN LAITOS

KUUSEN VARHAISKEHITYS 5-17-VUOTIAILLA KÄÄNTÖMÄTÄSTYSKOORTEILLA –
MAASTO- JA PAIKKATIEOTOAINEISTOIHIN PERUSTUVA PITUUSKEHITYKSEN
MALLINNUS

Jani Järvenpää

Pro gradu tutkielma

Metsien ekologia ja käyttö

12/2016



Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos/Institution – Department Metsätieteiden laitos
Tekijä/Författare – Author Järvenpää, Jani Jarmo Mikael		
Työn nimi / Arbetets titel – Title Kuusen varhaiskehitys 5-17-vuotiailla kääntömätästyskohteilla – Maasto- ja paikkatietoaineistoihin perustuva pituuskehityksen mallinnus		
Oppiaine / Läroämne – Subject Metsien ekologia ja käyttö		
Työn laji/Arbetets art – Level Pro gradu -tutkielma	Aika/Datum – Month and year Joulukuu 2016	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 61 s. + liitteet 2 s.
Tiivistelmä/Referat – Abstract <p>Kuusi (<i>Picea abies</i>) uudistetaan nykyisin pääasiassa mätästään muokatuille uudistusaloille. Mätästysmenetelmien on havaittu parantavan kuusen kasvua ja kehitystä muihin maanmuokausmenetelmiin verrattuna. Kääntömätästyskohteille on kuitenkin tutkittu vielä vähän eikä kääntömätästetyille kohteille ole aiemmin luotu omia pituuskehitystä kuvaavia malleja. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tehdä pituusmallit kuvaamaan istutuskuusen pituuskehitystä 5-17-vuotiailla kääntömätästyskohteilla. Mallit laadittiin sekä metsikkö- että puutasolle. Mallien selittävien muuttujien vaikutusta kuusen pituuskehitykseen tutkittiin ja samalla pyrittiin arvioimaan kääntömätästyskohteiden soveltuvuutta erilaisille uudistusaloille. Luotua metsikkötason keskipituusmallia vertailtiin myös jo olemassa oleviin kuusen pituusmalleihin.</p> <p>Tutkimusta varten kerättiin yhteensä 49:ltä kääntömätästetyltä kuuselta koeala-aineisto (n=853). Kääntömätästetytkohteet sijaitsivat Pirkanmaalla sekä Keski-Suomessa. Kerätyn koeala-aineiston rinnalla käytettiin myös paikkatietoaineistoja (Maanmittauslaitoksen korkeusmalli sekä Ilmatieteen laitoksen sade- ja lämpösummadata) selittämään kuusen pituuskehitystä. Paikkatietoaineistoja hyödynnettiin erityisesti puutason pituusmallissa. Aineisto analysoitiin SPSS-ohjelmistolla, jossa pituusmallit sovitettiin Generalized linear models -proseduuria käyttäen. Lopulliset mallit sisälsivät vain merkitseviä pituutta selittäviä muuttujia.</p> <p>Molemmissa malleissa taimien ikä, kasvupaikkatyyppi sekä kasvukauden aikainen sadesumma korreloivat positiivisesti pituuskehityksen kanssa. Malleissa pituuskehitystä puolestaan hidasti lehtipuiden pituuskilpailu. Metsikkötason keskipituusmallissa (RMSE 17 %) taimien pituuskehitys parani myös maatalajien karkeuden lisääntyessä. Puutason pituusmallissa (RMSE 32,2 %) korkeusmallista johdetut maaston topografiaa kuvaavat muuttujat selittivät hyvin pituuskehitystä. Rinteen ilmansuunta hidasti pituuskehitystä ilta-aurinkoisilla lounas-, länsi- ja luoderinteillä. Samoin pituuskehitys oli hitaampaa maaston topografisen aseman alavissa kohdissa kuten notkoissa ja alarinteissä. Puutason mallissa pituuskehitystä hidastivat lisäksi kilpailevien puulajien lukumäärä, hallatuhot, soistuneisuus sekä korkeus merenpinnasta. Maanmuokkaus istutusta edeltävänä vuonna puolestaan paransi pituuskehitystä puutason mallissa.</p> <p>Keskipituusmallia verrattaessa havaittiin, että kääntömätästettyjen kohteiden keskipituuskehitys oli paljon parempaa kuin muokkaamattomilla tai pintamuokatuilla (äestys/laikutus) kohteilla. Mielenkiintoinen havainto oli myös, että kääntömätästettyjen kohteiden keskipituuskehitys vastasi lähes täydellisesti nykyistä Motti-ohjelman (Luonnonvarakeskus) mätästettyjen kohteiden pituuskehitystä. Tutkimustulosten perusteella kuusen taimet kehittyvät kääntömätästyskohteilla hyvin ja niiden kasvu kestää vertailun myös muihin mätästysmenetelmiin. Tutkimuksen perusteella Maanmittauslaitoksen sekä Ilmatieteen laitoksen paikkatietoaineistoja voidaan hyvin hyödyntää myös puiden pituuskehityksen mallinnuksessa.</p>		
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Pituusmalli, kääntömätästys, kuusi, <i>Picea abies</i> , pituuskilpailu, topografia, GIS, digitaalinen paikkatietoaineisto		
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsingin yliopiston kirjasto – Helda / E-thesis (opinnäytteet)		ethesis.helsinki.fi
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information Ohjaajat: Juho Rantala (Metsä Group) ja Pasi Puttonen (Helsingin Yliopisto)		



Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos/Institution– Department Forest Sciences
Tekijä/Författare – Author Järvenpää, Jani Jarmo Mikael		
Työn nimi / Arbetets titel – Title Norway Spruce development on 5-17-years old inverted sites – Height modeling based on field- and GIS-data		
Oppiaine /Läroämne – Subject Forest Ecology and Management		
Työn laji/Arbetets art – Level Master's thesis	Aika/Datum – Month and year December 2016	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 61 p. + appendices 2 p.
Tiivistelmä/Referat – Abstract <p>Norway spruce (<i>Picea abies</i>) is nowadays generally planted on mounted sites in Finland. When compared to other cultivation methods, it has been noticed that mounding has significantly improved seedlings development and growth. However, inverting is still one of the mounding methods, which has been little examined nor height development models created in Finland. In this study the aim was to generate height development models for Norway spruce in 5-17-years old inverted sites. Two models were created both stand and tree levels. The effect of the model's predictor variables to the height development was analyzed. Height model at stand level was also compared with the other Norway spruce height models in Finland.</p> <p>The study material consisted of 49 inverted Norway spruce plantations in southern Finland. Total number of sample plots were 853. With the sample plot data, available GIS-data (National Land Survey of Finland and Meteorological Institute) was also used to improve height models accuracy. GIS-data was utilized specially in the tree level model. Whole data was analyzed in SPSS-software where height models were fitted by using Generalized linear models -procedure. Both of the final height models included only significant height predictors.</p> <p>In the both models seedlings age, site type (Cajander 1949) and growing season's precipitation sum were correlated positively with Norway spruce height. Broad-leaved trees height competition was also noticed to reduce height development in the both models. At the stand level model (RMSE 17 %) seedlings height development was also increased in coarse-grained soils. At the tree level model (RMSE 32,2 %) digital elevation model (DEM) derived topographic variables were correlated well with Norway spruce height. Hillside aspect decreased height development in Southwest, West and Northwest sides of the hill, where afternoon sun typically occur. Seedlings height was also poorer on topographic lowlands like lower slopes and depressions. In the tree level, height development was also decreased according to amount of competitive trees, frost damages, paludification and elevation. The inverting done a year preceding planting increased height development in the tree level model, when compared to the inverting done at the same year with planting.</p> <p>Model comparison at stand level demonstrate that seedlings height development was significantly better on inverted sites than on harrowed or scalpered sites. Interesting found was also that height development on inverted sites was almost identical to the mounted sites height development in the Motti-stand level simulator (Natural Resources Institute Finland). Stand level comparison indicated that Norway spruce growth and development is promising in the inverted sites and it stands comparison to the other mounding methods also. This study also proved that it is possible to utilize GIS-data (National Land Survey of Finland and Meteorological Institute) in trees height modeling.</p>		
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Height model, inverting, Norway Spruce, <i>Picea abies</i> , height competition, topography, GIS, digital GIS-data		
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsinki University Library – Helda / E-thesis (E-Thesis)		ethesis.helsinki.fi
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information Supervisors: Juho Rantala (Metsä Group) and Pasi Puttonen (University of Helsinki)		

Sisällysluettelo

KÄSITTEET	5
1 JOHDANTO	6
1.1 Työn tausta	6
1.1.1 Kuusentaimien pituuskasvurytmi ja kehitys	6
1.1.2 Kasvuun vaikuttavat tekijät	8
1.1.3 Maanmuokkaus kuusen uudistusaloilla	12
1.1.4 Mätästyksen vaikutus kuusen varhaiskehitykseen	13
1.1.5 Kääntömättään ominaisuuksia	16
1.1.6 Kuusentaimien pituuden mallinnus	18
1.2 Työn tavoitteet	20
2 AINEISTO JA MENETELMÄT	21
2.1 Maastoaineisto	21
2.1.1 Otanta	21
2.1.2 Mittausten valmistelut	23
2.1.3 Koeala mittaukset	24
2.2 Paikkatietoaineisto	28
2.2.1 Aineistot	28
2.2.2 Paikkatietoanalyysit	30
2.3 Aineiston valmistelut analyysiin	32
2.4 Aineiston analyysi	35
3 TULOKSET	38
3.1 Metsikkötason keskipituusmalli kuuselle	38
3.2 Puutason pituusmalli kuuselle	43
4 TULOSTEN TARKASTELU	48
4.1 Metsikkötason keskipituusmallin tarkastelu	48
4.2 Metsikkötason keskipituusmallin vertailu	49
4.3 Puutason pituusmallin tarkastelu	51
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	54
KIRJALLISUUS	56
LIITTEET	62
Liite 1: Kääntömätästykskuvioiden perustiedot (Metsä Group)	62
Liite 2: Maastolomake	63

KÄSITTEET

Mätästys = Maanmuokkausmenetelmä jossa uudistusalalle tehdään koneellisesti kohoumia maa-aineksesta taimien istutuspaikoiksi. Suomessa käytössä olevia mätästysmenetelmiä ovat Luorasen ym. (2012) mukaan laikkumätästys, kääntömätästys, naveromätästys ja ojitusmätästys.

Kääntömätästys = Kääntömätästyksessä kaivinkoneen kauhalla otetaan maata, joka pudotetaan kääntäen samaan kuoppaan, josta se on otettu. Tällöin mättään pintaosan muodostaa kivennäismaa ja humuskerros jää pääosin kuopan pohjalle.

Lineaarinen kovarianssianalyysi = ”Lineaarista mallinnusta kutsutaan kovarianssianalyysiksi, jos osa selittävistä muuttujista on numeerisia ja osa luokittelu- tai järjestysasteikolla määriteltyjä muuttujia” (Isotalo 2016).

Metsikkötason kasvumallit = ”Metsikkötason malleilla (Whole stand models) tarkoitetaan niitä kasvu- ja tuotosmalleja (growth and yield models), joilla kuvataan metsikön puuston summa-, keski- ja kokojakaumatunnusten kehittymistä ajan ja toimenpiteen suhteen” (Miina 2001).

Puutason kasvumallit = ”Puutason kasvumalleja (individual-tree growth models) tarvitaan erityisesti metsiköiden ja sekametsiköiden kasvun ja kehityksen ennustamiseen. Vaikka niillä ei päästä merkittävästi parempaan tarkkuuteen metsikkökohtaisten, koko puustoa koskevien tunnusten kuvaamisessa, niillä pystytään kuvaamaan puiden välinen kasvun vaihtelu ja keskinäinen vuorovaikutus metsikön sisällä” (Miina 2001).

Rasterimuotoinen paikkatieto = ”Rasterimuotoinen paikkatietoaineisto on kuvamuotoista paikkatietoaineistoa. Aineisto koostuu säännöllisistä ja tasasuuruista ruuduista, joita kutsutaan pikseleiksi. Pikseli on kuvan pienin yksikkö, joka kuvaa tiettyä aluetta maastossa” (Paikkaoppi 2016).

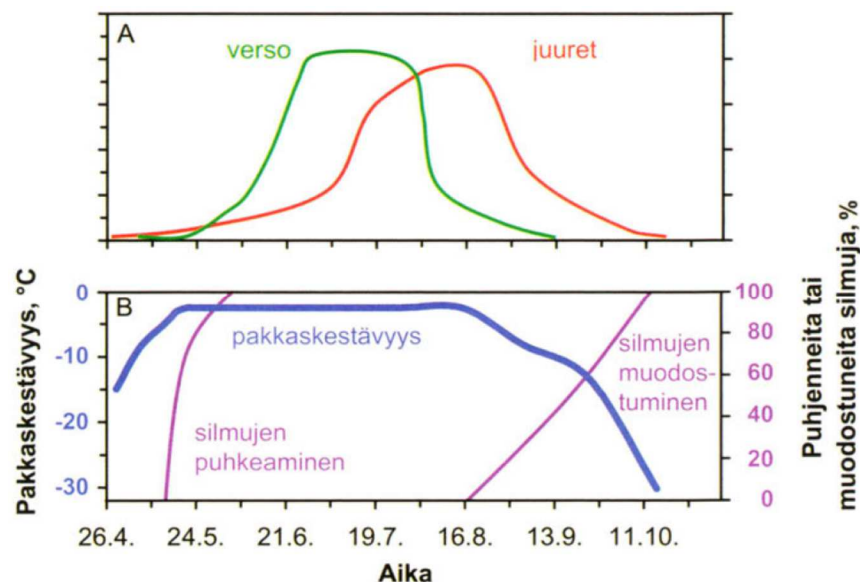
Residuaali = Residuaali on todellisen mitatun havainnon (y_i) ja siitä mallilla luodun ennusteen (\hat{y}_i) välinen erotus ($y_i - \hat{y}_i$). Residuaalien avulla lasketaan mallien virhearviot ja niiden tarkastelu on olennainen osa mallinnusta.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

1.1.1 Kuusentaimien pituuskasvurytmi ja kehitys

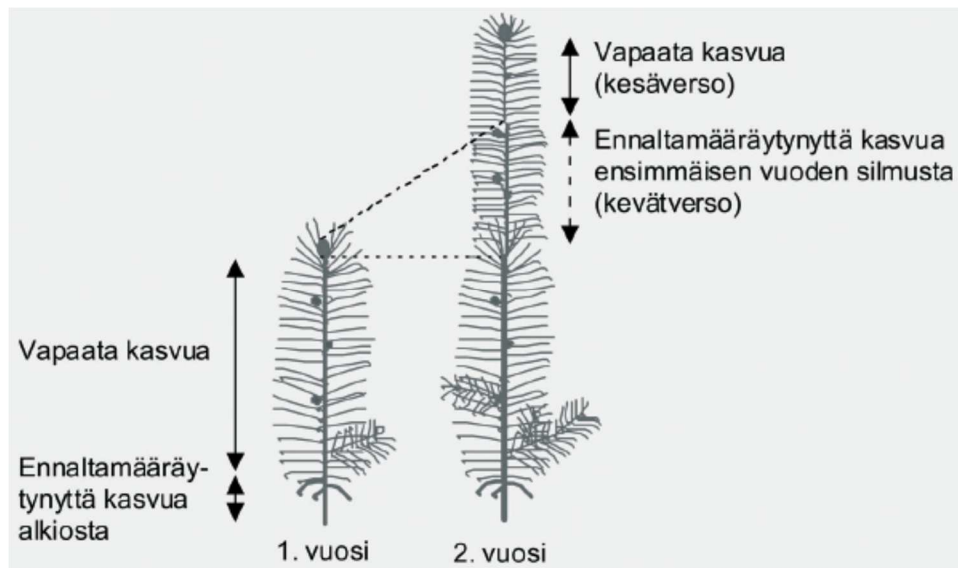
Kuusen (*Picea abies* L. Karst.) pituuskasvu alkaa keväällä toukokuussa silmujen puhkeamisella (kuva 1). Silmujen puhkeamiseen ja pituuskasvun alkamiseen vaikuttaa päivän piteneminen ja erityisesti lämpötilan kohoaminen (Luoranen ja Kiljunen 2006). Kuusella silmut puhkeavat, kun lämpösummaa on kertynyt 100-150 d.d (degree day) (Rikala 2012).



Kuva 1. Kaaviokuva kuusen paakkutaimien A) verson pituuden ja juurten kuivamassan kasvun ajoittumisesta sekä B) neulasten pakkaskestävyyden ja päätesilmujen kehityksestä. Kuva: Luoranen ja Kiljunen 2006.

Taimilla pituuskasvurytmi on kuitenkin erilainen kuin aikuisilla puilla. Nuorten taimien kasvu voidaan jakaa ennaltamääräytyneeseen ja vapaaseen kasvuun (kuva 2). Ennaltamääräytynyt kasvu on edellisenä kesänä silmuun muodostuneiden neulasaiheiden kasvua neulasiksi sekä neulasvälien pitenemistä uudeksi rangaksi (Rikala 2005). Vapaa kasvu puolestaan tarkoittaa, että kesän aikana muodostuvat uudet neulasaiheet eivät jää silmuun odottamaan seuraavaa kesää, vaan jatkavat välittömästi kasvuaan neulasiksi ja neulasvälit venyvät rangaksi (Rikala 2005). Unungerin ym. (1988) mukaan vapaan

kasvun on arvioitu olevan kuusella noin 16–21 % kokonaispituuskasvusta toisena kasvukautena. Taimen vanhetessa tämä vapaan kasvun osuus kuitenkin pienenee ja samalla lyhenee myös pituuskasvuun kulunut aika (Rikala 2010). Kuusella pituuskasvu siirtyy kokonaan ennaltamääräytyneeksi 4-10 vuodesta lähtien (Rikala 2005). Rikalan (2010) mukaan nuoruusvaiheen pitemmän kasvukauden ja vapaan kasvun esiintyvyyden on arveltu johtuvan siitä, että nuorella iällä taimen on hyödynnettävä koko kasvukausi mahdollisimman tehokkaasti kyetäkseen kilpailemaan pintakasvillisuuden kanssa.



Kuva 2. Ensimmäisenä vuonna kuusentaimi kasvaa sirkkataimivaiheen jälkeen vapaata kasvua muodostaen loppukesällä päätesilmun. Toisena vuonna silmuissa olevien neulasaiheiden kasvaessa neulasiksi ja neulasvälien pidentyessä syntyy uuteen rankaan aluksi ennaltamääräytynyttä kasvua ja tämän vaiheen jälkeen version pituuskasvu jatkuu edelleen vapaana kasvuna. Kuva: Rikala 2005.

Verson pituuskasvun 1-2 ensimmäistä viikkoa ovat yleensä hidaskasvuja, mutta tämän jälkeen seuraa nopea ennaltamääräytyneen kasvun pyrähdys, jolloin tapahtuu 60-70 % koko vuoden pituuskasvusta noin kuukauden sisällä (Grossnickle 2000).

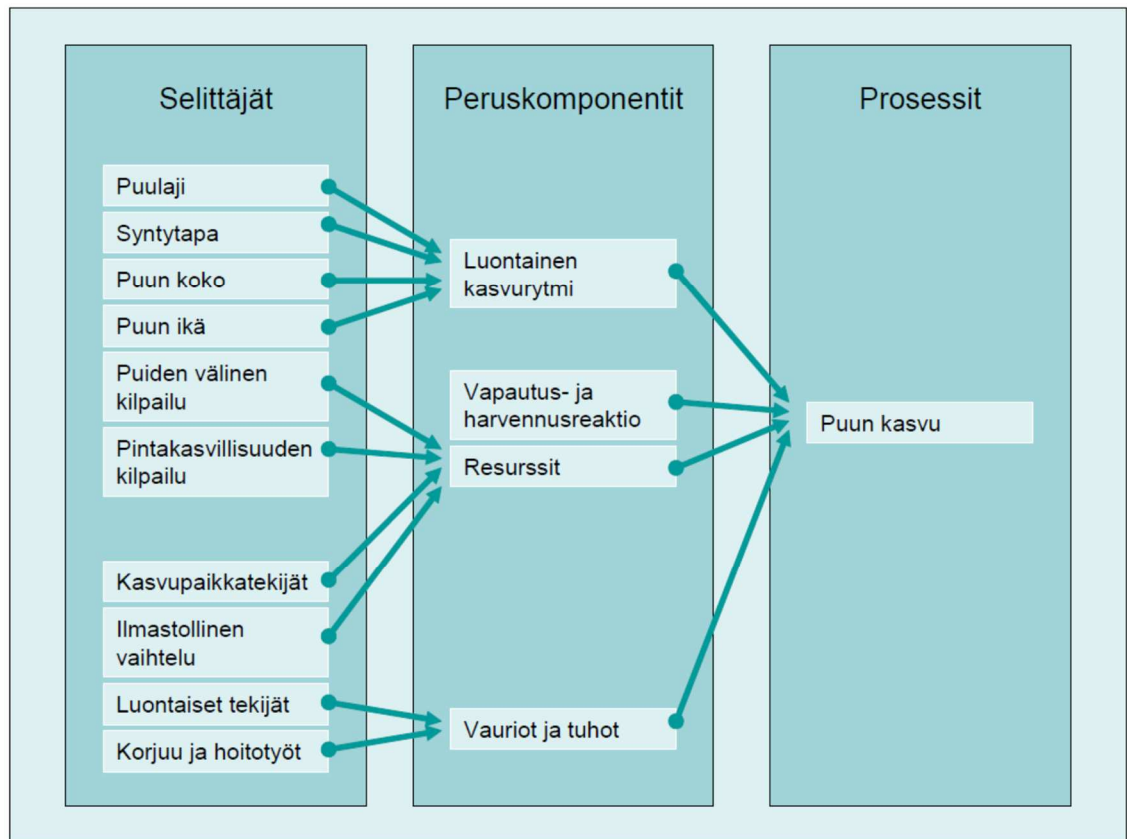
Pituuskasvun aikana version pakkaskestävyys on myös heikoimmillaan (kuva 1), kun kasvavissa solukoissa on paljon vettä (Luoranen ja Kiljunen 2006). Kuusen nuori kasvain paleltuu, jos lämpötila laskee alle -3 °C (Uotila ym. 2015). Tällöin veden jäätyminen solukossa rikkoo solurakenteet, jolloin silmut sekä kasvaimet vioittuvat tai kuolevat. Luorasan ja Kiljusen (2006) mukaan hallavioitukset ovat yleensä kuitenkin vain lieviä ja yli vuotta vanhemmat taimet kuolevat niihin harvoin.

Verson pituuskasvu päättyy 1-2 vuotiailla taimilla elokuun puolivälissä, vanhemmilla taimilla jo aiemmin (Luoranen ja Kiljunen 2006). Pitenevä yö ja valon määrän väheneminen pysäyttävät version pituuskasvun (Rikala 2012). Pituuskasvun päättymisen jälkeen alkaa uusien silmujen muodostuminen, joka kestää noin 2-3 viikkoa (Luoranen ja Kiljunen 2006). Pituuskasvun päättymisen jälkeen kuusi jatkaa vielä rungon läpimitan kasvattamista aina heinäkuun loppuun asti (Valkonen 2014). Juuriston kasvu heikkenee vasta syksyllä valon vähetessä sekä lämpötilan laskiessa, mutta se voi jatkua aina lokakuulle asti (kuva 1), jos on riittävän lämmintä (Rikala 2012).

Pituuskasvun tarkoituksena on pitää puu mukana kilpailussa kasvutilasta sekä lisätä latvuksen pituutta ja samalla yhteyttävää pinta-alaa. Kuusella ja muilla havupuilla rungon pituuskasvu on latvajakoista eli rungon pituuskasvu jatkuu lähes aina rungon ylimmästä silmusta (Valkonen 2014). Samalla kun yhteyttävä lehvästö kasvaa niin se tuottaa yhä enemmän yhteyttämistuotteita kasvua varten ja puun pituuskasvu nopeutuu (Valkonen 2001). Suurenevan latvuksen, rungon, oksien ja juuriston ylläpitoon kuluu kuitenkin yhä enemmän yhteyttämistuotteita, jolloin pituuskasvu alkaa lopulta hidastua. Istutuskuusikossa valtapituuskasvun käänne saavutetaan kasvupaikasta riippuen noin 5-8 m valtapituudessa (Valkonen 2001). Iältään kuuset ovat tuolloin noin 18–25 vuotiaita (Valkonen 2014).

1.1.2 Kasvuun vaikuttavat tekijät

Taimien kasvuun vaikuttavat samat perinnölliset sekä toiminnalliset perustekijät, kuin niiden eloonjäämiseen ja terveyteenkin (Valkonen 2001). Tärkeimmät puun pituuden ja läpimitan kasvuun vaikuttavat tekijät käyvät ilmi kuvasta 3.



Kuva 3. Taimien kasvuun vaikuttavat tärkeimmät tekijät. Kuva: Valkonen ym. 2001.

Puun kasvu riippuu sen kyvystä käyttää geneettistä ja perinnöllistä kasvupotentiaaliaan vallitsevissa olosuhteissa (Miina 2001). Puun kasvuun vaikuttavat tekijät voidaan jakaa puun sisäisiin ja ulkoisiin tekijöihin. Miinan (2001) mukaan puun sisäisillä tekijöillä tarkoitetaan puulajin perimää, kokoa sekä ikää, jotka yhdessä määräävät puun kasvurytmin. Valkonen ym. (2001) ovat lisäksi huomioineet puun syntyvän (siemen tai vesa) (kuva 3), joka myös vaikuttaa olennaisesti puun luontaiseen kasvurytmiin. Luontainen kasvurytmi kuvaa puun nopeinta kehitystä tietyllä kasvupaikalla, kun mitkään ulkopuoliset häiriötekijät, kuten kilpailu tai tuhot, eivät hidasta sitä (Valkonen 2001). Puhtaiden ja tasaikäisten viljelytaimikoiden valtapuiden pituuskasvua voidaan pitää esimerkkinä tällaisesta kehityksestä (Valkonen 2001).

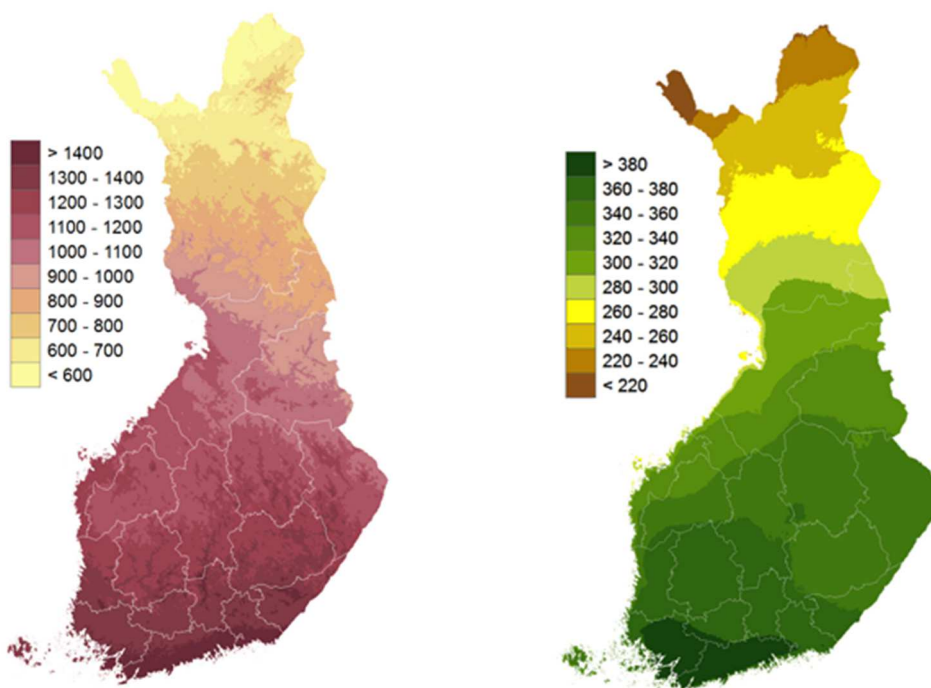
Ulkoiset tekijät puolestaan kuvaavat puun kasvuolosuhteita. Tällaisia puun ulkoisia tekijöitä ovat mm. kasvupaikan hyvyys, sään vuotuinen vaihtelu, metsätuhot ja puiden välinen kilpailu kasvutekijöistä (Miina 2001). Kasvupaikan hyvyys on laaja käsite ja tarkoittaa eri kasvutekijöiden potentiaalista saatavuutta. Malleissa kasvupaikan hyvyttä

kuvataan esimerkiksi kasvupaikkatyypin avulla, sillä joitakin potentiaalliseen kasvuun vaikuttavia tekijöitä kuten ravinteet, vesi ja säteily on usein maastossa vaikea mitata (Miina 2001).

Tammisen ja Mälkösen (2003) mukaan kasvupaikan viljavuuteen ja hyvyyteen vaikuttavat erityisesti ilmasto, maaperä, topografia sekä ihmisen toiminta.

Säätekijöistä Suomessa tärkein kasvua rajoittava tekijä on kasvukauden lämpimyyttä sekä kuusella Etelä-Suomessa myös kuivuus (Miina 2001). Nygrenin (2007) mukaan etenkin kasvukauden pituus, minimilämpötilat sekä lämpösumma (kuva 4) kuvaavat metsien kasvun kannalta tärkeitä lämpöoloja.

Kasvukauden aikainen sademäärä (kuva 4) vaikuttaa myös puiden kasvuun ja kehitykseen. Alkukesän sateettomat poutajaksot voivat haitata puuston uudistumista erityisesti kuivilla kasvupaikoilla Etelä-Suomessa (Nygren 2007). Heiskanen (1989) mukaan alkukesän sadanta jääkin keskimäärin selvästi pienemmäksi kuin mitä kasvit voisivat sinä aikana haihduttaa. Yksittäisistä kuukausista myös heinäkuun vesitase voi olla merkityksellinen metsäpuiden menestymiselle, koska tällöin kasvukauden aikainen kuivuusstressi on suurimmillaan (Heiskanen 1989).



Kuva 4. Termisen kasvukauden keskimääräinen lämpösumma (°C·vrk) ja sadesumma (mm) vuosina 1981-2010. Kuva: Ilmatieteen laitos.

Maan hienojen lajitteiden määrä yleensä lisää kasvupaikan viljavuutta (Tamminen ja Mälkönen 2003). Maaperän hienojakoisuus indikoi hyvästä veden- ja ravinteidensaataavuudesta, mutta erityisesti maan humuskerroksen typpipitoisuus korreloi sekä männyn että kuusen tuotoskyvyn kanssa (Heiskanen 2003). Kuitenkin liian korkea savi- ja hiesulajitteiden osuus heikentää maan ilmavuutta ja saattaa täten alentaa viljavuutta (Tamminen ja Mälkönen 2003). Veden liiallisen varastoitumisen vuoksi erityisesti hiesu- ja savimaat sekä hiesu- ja savimoreenit ovat vesitaloudeltaan huonoja (Heiskanen 1989). Näillä maan routivuus voi lisäksi olla haitallisen voimakasta (Heiskanen 1989).

Vesitaloudeltaan sopivina ja metsätalouskäyttöön hyvinä voidaan pitää hietaisia moreenimaita ja lajittuneita hietamaita (Heiskanen 1989). Karkearakeiset hiekka- ja soramoreenit lienevät vesitaloudeltaan ainakin tyydyttäviä (Heiskanen 1989). Puuston pituusboniteettien mukaan arvioituna 20-40 %:n hienomaaosuus (savi-hieno hietä) antaa hyvät edellytykset korkealle puuntuotoskyvylle (Tamminen ja Mälkönen 2003). Maalaji on silloin karkea hietä tai vastaava moreeni (Tamminen ja Mälkönen 2003).

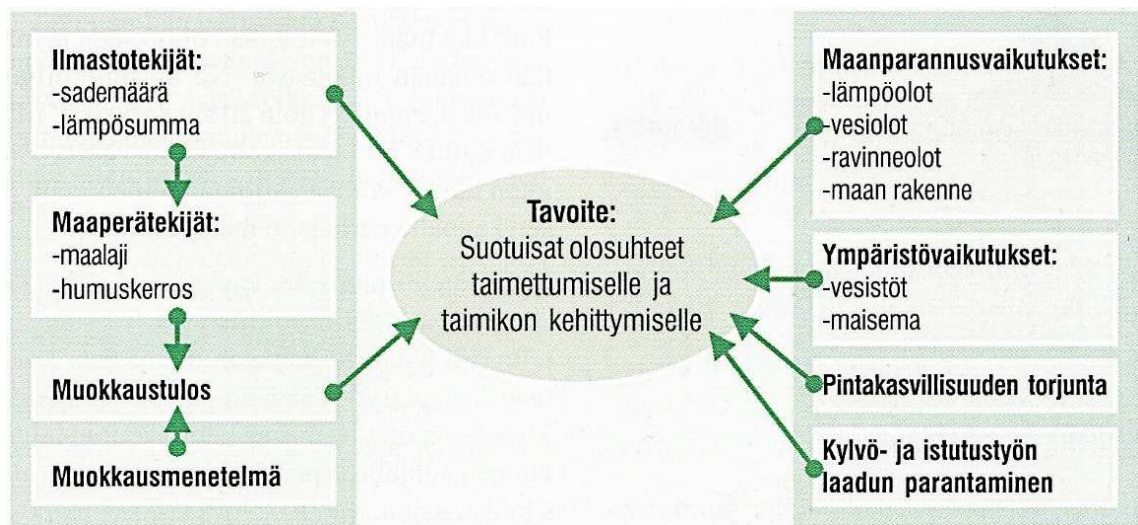
Maaston topografia vaikuttaa maan viljavuuteen niin lämpö- ja vesiolojen kuin ravinteisuudenkin välityksellä (Tamminen ja Mälkönen 2003, Nygren 2007). Maaston korkeilla rinneilla vesitalous voi olla heikko, koska sadevedet valuvat nopeasti rinnettä alaspäin ja haihdunta on suurta tuulisuuden vuoksi (Heiskanen 1989). Vesitaloutta heikentää myös maaston korkeuden lisääntyessä humuskerroksen ohentuminen sekä hienojen lajitteiden väheneminen (Heiskanen 1989, Tamminen ja Mälkönen 2003). Rinteiden alaosat ja notkot ovat siksi yleensä viljavampia kuin ylärinteet ja mäkien laet hienorakeisten maalajien sekä ylärinteiltä valuvan happi- ja ravinnepitoisen veden ansiosta (Tamminen ja Mälkönen 2003, Nygren 2007).

Myös rinteiden ilmansuunta vaikuttaa lämpöolojen sekä ilmeisesti osin myös vesitaloudenkin kautta kasvuoloihin. Heiskanen (1989) mukaan rinteiden yläosissa ja etelä-länsipuolella maan pintakerrosten vesipitoisuus on alhaisempi kuin alempana ja rinteiden pohjoispuolella.

Ihmisen toiminta vaikuttaa taimien kasvuun mm. tehtyjen metsänhoitotöiden kautta. Näistä esimerkkinä voidaan mainita uudistusalan maanmuokkaus sekä varhaisperkaus ja taimikonhoito, joilla kontrolloidaan kasvatettaviin taimiin kohdistuvaa puiden välistä kilpailua.

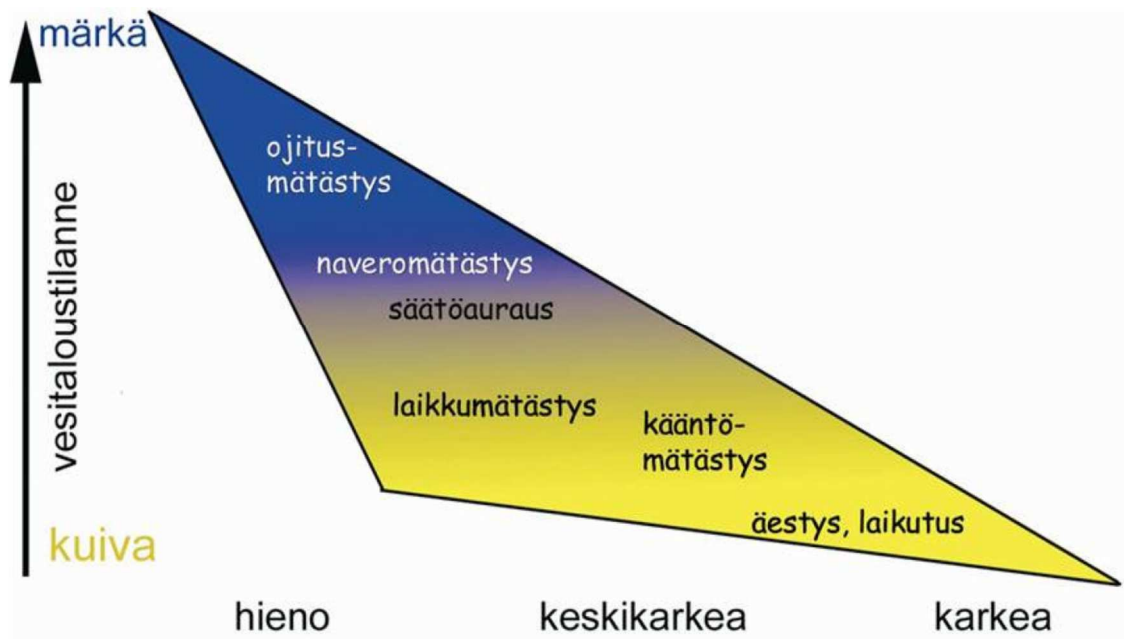
1.1.3 Maanmuokkaus kuusen uudistusaloilla

Maanmuokkaus sekä maanpinnan käsittely kuuluvat oleellisena osana laadukkaaseen metsänuudistamisketjuun. Maanmuokkauksen tärkeimpänä tavoitteena on turvata metsänuudistamisen onnistuminen ja parantaa samalla taimien alkukehitystä (Kuva 5) (Mälkönen 2001, Mälkönen 2003, Luoranen ym. 2007). Kuusen viljelyssä onnistuneella maanmuokkauksella varmistetaan riittävästi hyviä istutuspaikkoja, joissa taimilla on muuta ympäristöään paremmat edellytykset kehittyä täysikasvuiseksi puiksi.



Kuva 5. Maanmuokkaukseen liittyviä tekijöitä. Kuva: Mälkönen 2001.

Maanmuokkaus kuusen istutusta varten tehdään nykyisin pääosin mätästäen (Luonnonvarakeskus tilastotietokanta 2015). Suomessa käytössä olevia mätästysmenetelmiä ovat Luorasen ym. (2012) mukaan laikkumätästys, kääntömätästys, naveromätästys ja ojitusmätästys. Käytettävä mätästysmenetelmä vaihtelee uudistusalan ominaisuuksien (esim. vesitalous, ravinnetalous, kivisyys, maalaji) mukaan (kuva 6) ja tarvittaessa mätästysmenetelmää voidaan jouhevasti vaihtaa uudistusalan sisälläkin.



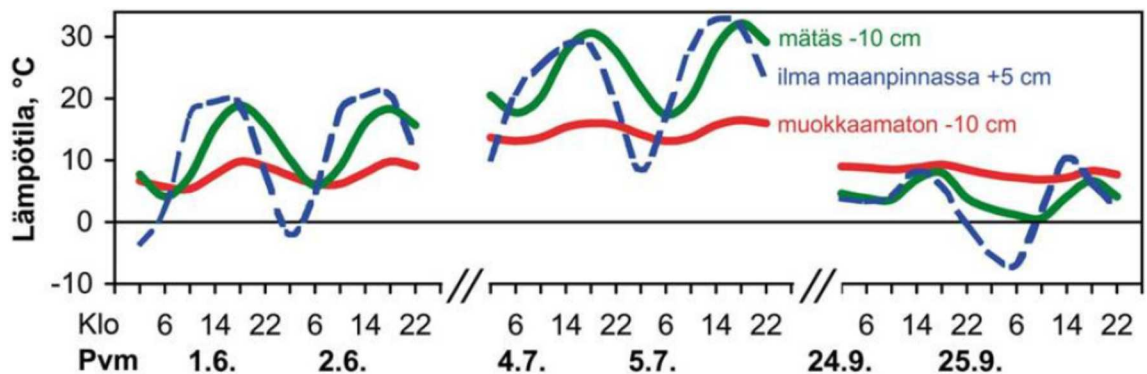
Kuva 6. Periaatekuva maanmuokkausmenetelmän valinnasta vesitaloustilanteen ja maanraekoon perusteella. Kuva: Luoranen ym. 2007.

Ojitusmätästys on pääasiallinen muokkausmenetelmä turvemailla ja vesitaloudeltaan ongelmallisilla kohteilla. Ojitusmätästyksen avulla voidaan uudistusalan vesitaloudellista tilaa parantaa johtamalla ylimääräisiä vesiä pois kuviolta. Naveromätästyksessä kuviolle tehdään matalia vakoja (navero), joilla on vain lievä kuviota kuivattava vaikutus (Luoranen ym.2007). Naveromätäs samoin kuin ojamätäs tehdään naverosta /ojasta saatavasta maa-aineksesta pudottamalla se ylösalaisin muokkaamattomaan kohtaan. Vesitaloudeltaan kunnossa olevilla kohteilla voidaan puolestaan käyttää laikkumätästystä tai kääntömätästystä. Näiden suurimpana erona on se, että laikkumättäystä tulee hieman korkeampi kaksinkertainen humuskerroksen ansiosta ja lisäksi laikkumättään viereen syntyy kivennäismaalaikku.

1.1.4 Mätästyksen vaikutus kuusen varhaiskehitykseen

Mätästys parantaa kuusen varhaiskehitystä istutusaloilla monin eri tavoin. Mätästyksessä mättään pinta muodostuu kivennäismaasta ja samalla muodostuu kohouma, jotka yhdessä lisäävät maahan imeytyvän säteilyn määrää (Heiskanen 2003, Luoranen ym. 2007). Mätästys siis kohottaa maan lämpötilaa (kuva 7), mikä puolestaan parantaa juurten

kasvua sekä veden ja ravinteiden ottoa (Repo ja Valtanen 1994, Mälkönen 2003, Luoranen ja Kiljunen 2006, Luoranen ym. 2012).



Kuva 7. Mätään ja muokkaamattoman maan lämpöolojen vaihtelu kasvukauden eri vaiheissa. Kuva: Luoranen ja Kiljunen 2006.

Kohoumissa taimi on myös paremmassa suojassa lieviltä hallatuhoilta kylmän ilman valuessa painanteisiin (Luoranen ym. 2007). Toisaalta kohoumat saattavat routaantua helpommin ja syvemmältä (Mälkönen 2003, Luoranen ja Kiljunen 2006). Lisäksi lumi sulaa kohoumilta nopeammin, mikä lisää keväistä ahavatuhoriskiä (Heiskanen 2003, Luoranen ym. 2007).

Mätästys löyhentää maa-ainesta mättäessä, mikä helpottaa kuusen taimien juurtumista mättääseen erityisesti tiiviillä ja hienoilla mailla (Heiskanen 2003). Samalla mättääseen voi myös sekoittua humusta, mikä yleensä parantaa mätään vesitalous- ja ravinneominaisuuksia (Repo ja Valtanen 1994). Löyhempi maa lisäksi lämpiää nopeammin, mikä edelleen parantaa juurten kasvuolosuhteita (Luoranen ja Kiljunen 2006, Luoranen ym. 2007). Löyhempi rakenne mättäessä edistää myös sadeveden imeytymistä (Mannerkoski 1991, Mälkönen 2003). Tosin sateen jälkeen käyttökelpoisen veden määrä mättäissä laskee nopeasti ja taimet tulisikin siksi istuttaa tarpeeksi syvälle (Mälkönen 2003). Luorosen ja Kiljusen (2006) mukaan maa ei myöskään saisi jäädä mättäessä liian löyhäksi, sillä silloin juuripaakut eivät ole riittävästi kosketuksissa maahan, mikä aiheuttaa taimille kuivumisvaaran.

Oikeaoppisesti tehdyissä, tiiviissä mättäissä, kapillaarinen vedennousu katkeaa mätään sisällä olevaan humuskerrokseen. Mätään sisus pysyy tällöin kosteana myös kesän kuivanakin aikana, toisin kuin muokkaamattomassa maassa, josta vesi haihtuu

humuskerroksesta ilmaan (Rantala 2016). Varsinkin istutusvuonna tämä on erityisen tärkeää, kun taimien juuret ovat vielä kehittymässä mättäässä (Rantala 2016). Toisaalta, jos humuskerros mättäässä pääsee kuivumaan, niin alentaa se myös vesipitoisuutta korkeissa mättäissä ja samalla hidastaa vedensaatavuutta alhaalta päin (Örlander 1985, 1986). Tämän estämiseksi mättään sisällä olevan humuskerroksen on kuivumisen estämiseksi peityttävä kokonaan kivennäismaalla ja toisaalta mättään sisään ei saa jäädä esim. hakkuutähdettä (Luoranen ja Kiljunen 2006).

Mättään lämpötilan noustessa, ilmavuuden parantuessa maa-aineksen löyhentyessä sekä humuksen ja kivennäismaan sekoittuessa, paranee samalla myös taimien ravinnetalous mikrobitoiminnan aktivoituessa (Mälkönen 2003, Luoranen ja Kiljunen 2006). Mättään sisään jäävä humuskerros/kaksoishumuskerros hyödyttää myös maatuessaan taimien kasvua, tarjoten näin lisää ravinteita taimien käyttöön muutaman vuoden ajan (Mälkönen 2003, Luoranen ym. 2012).

Mätästettäessä mättäiden pinta vapautetaan samalla pintakasvillisuuden kilpailusta. Taimien kasvu paranee tällöin, kun niiden ei tarvitse enää voimakkaasti kilpailla valosta, vedestä ja ravinteista pintakasvillisuuden kanssa (Örlander ym. 1996, Grossnickle 2000, Luoranen ja Kiljunen 2006). Tutkimuksissaan Nilsson ym. (1996), Örlander ym. (1996) ja Nilsson ja Örlander (1999) ovat havainneet, että erityisesti pintakasvillisuuden maanalaisella kilpailulla on kuusen kasvuun ja elossaoloon heikentäviä vaikutuksia. Ympäristöään korkeammalla sijaitsevat mättäät suojaavat myös jo itsessään taimia, jolloin ne eivät jää niin helposti pintakasvillisuuden alle (Luoranen ym. 2007). Lisäksi kohoumille, joiden kivennäismaapinta kuivahtaa, syntyy yleensä kilpailevaa lehtipuustoakin vähemmän (Luoranen ym. 2007, Lehtosalo ym. 2011). Lehtosalon ym. (2011) tutkimuksessa havaittiin, että laikkumätästys ja paakkutaimien istutus parantavat selvästi kuusen istutustaimien kilpailuasemaa vesakkoa vastaan aikaisempiin menetelmiin (ilman muokkausta, kuokka- tai konelaikutus, äestys ja paljasjuuritaimien istutus) verrattuna. Tutkimuksen mukaan tuoreet mätäspinnat eivät vesoitu kovin herkästi, mikä antaa istutuskusuille riittävästi etumatkaa pituuskasvussa suhteessa myöhemmin syntyvään vesakkoon.

Maanmuokkaus, jossa paljastetaan riittävästi kivennäismaata taimien ympäriltä vähentää tutkitusti myös tukkimiehentäi tuhoja (Örlander ja Nilsson 1999, Poteri 2008, Nordlander

ym. 2011, Luoranen ja Viiri 2012). Mätästyksen tukkimiehentäi tuhoja vähentävästä vaikutuksesta ovat raportoineet mm. Heiskanen ja Viiri (2001), Rantala ja Heiskanen (2003), Nordlander ym. (2005), Saksa (2011), Luoranen ym. (2014). Nordlander ym. (2005) havaitsivat kokeessaan, että myös mikrotopografia vaikutti taimien alttiuteen tulla syödyksi. Kokeessa todettiin, että hiekkamättäillä olevat taimet tulivat syödyksi harvemmin kuin tasaisella humuksella tai hiekkakuopassa olevat taimet. Mättään tukkimiehentäi tuhoja torjuva vaikutus perustuu ilmeisesti siis sekä sen kivennäismaapintaan, että mättään ympäristöään korkeampaan asemaan.

1.1.5 Kääntömättään ominaisuuksia

Kääntömätästystä suositellaan käytettäväksi keskikarkeille kivennäismaille sekä turvemaille, joilla vesitalous on kunnossa (Luoranen ym. 2007, Luoranen ym. 2012, Äijälä 2014). Pienen maanmuokkauspintansa ansiosta kääntömätästys soveltuu hyvin myös niin maisemallisesti kuin ympäristöllisesti herkille alueille (Mälkönen 2001, Äijälä 2014, Soimasuo 2015).

Kuusentaimien hyvästä pituuskasvusta kääntömättäillä ovat raportoineet mm. Örländer ym. (1998), Nordborg (2001), Rantala ja Heiskanen (2003) sekä Hallsby ja Örländer (2004). Kääntömättäissä taimien on havaittu kasvavan jopa paremmin kuin laikkumättäissä, koska ilmeisesti maan kosteus on suurempaa sekä ravinteiden vapautuminen nopeampaa (Heiskanen ja Rantala 2001, Heiskanen 2003). Kääntömättäessä paikalleen käännetty maa myös lämpenee keväällä aikaisemmin kuin tavallisessa mättäessä, koska maan routaantuminen vaikuttaisi olevan vähäisempää (Örländer ym. 1998). Kääntömättäiden vähäisempi routaantuminen sekä lisääntynyt ravinteiden vapautuminen voivat siten lisätä taimien kasvua (Heiskanen ja Viiri 2001). Hienojakoisilla moreenimailla kääntömättäisiin istutettujen taimien on tosin raportoitu kasvavan heikommin kuin laikku- ja naveromättäissä (Heiskanen ym. 2013).

Kääntömätästyksessä, kuten muissakin mätästysmenetelmissä, maa-aines käännetään ylösalaisin, jolloin mättään pintaosa muodostuu kivennäismaasta humuskerroksen jäädessä mättään alle. Tällöin mättään välitön ympäristö vapautetaan samalla kilpailevasta pintakasvillisuudesta, mikä parantaa istutettavien taimien kilpailuasemaa. Pintakasvillisuuden kilpailu on voimakkainta erityisesti viljavammilla kasvupaikoilla.

Korkeampia mättäitä tuottaviin menetelmiin verrattuna, matalampi kääntömätäs saattaa kuitenkin olla aiemmin alttiimpi pintakasvillisuuden tukahduttavalle vaikutukselle. Lisäksi matalampi ja kosteampi kääntömätäs voi vesoittua/taimettua lehtipuilla herkemmin ja aiemmin kuin vaikkapa korkeampi ja kuivempi laikku- tai ojamätäs. Herkemmästä taimettumiskyvystä johtuen kääntömätästyksen on arvioitu kuitenkin olevan varteenotettava maanmuokkausmenetelmä sekä kylvö- että luontaisen uudistamisen kohteilla (Saksa 2014).

Paljastetusta kivennäismaasta tai maatuneesta turpeesta itävä siemen saa helpommin vettä kuin huokoisesta kangashumuserroksesta (Nygren 2011). Tämän takia turhaa maanpinnan paljastamista uudistusaloilla tulisi välttää ylimääräisen vesoittumisen välttämiseksi. Kääntömätästys on koneellisista maanmuokkausmenetelmistä tiettävästi vähiten kivennäismaata paljastava menetelmä tällä hetkellä. Laikkumätästykseen verrattuna kääntömätästyksessä ei muodostu ylimääräistä laikkuu mättään viereen, joka myöhemmin vesoittuisi.

Kääntömätästettäessä mättästä tulee aluksi matala, noin 5 cm korkea, mutta se madaltuu vielä lisää ensimmäisen talven aikana (Luoranen ym. 2012). Matalasta mätäskesta on todettu olevan hyötyä taimien alkukehitykselle. Korkeiden mättäiden kuivumisriskistä ja matalampien mättäiden eduista raportoi jo Laiho (1985). Repon ja Valtasen (1994) mätästyskokeessa taimet oli istutettu kaksilappeisille harjamättäille (2,2m x 4,0m ja lakikorkeus 50cm) eri mätäspaksuuksille. Myös tässä kokeessa havaittiin, että puiden kasvu sekä elossaolo oli parhainta mättäiden ohuilla laidoilla verrattuna mättään paksumpaan harjaan. Matalilla laikkumättäillä (<10 cm) on myös havaittu kuusen version kasvun olevan parempaa erityisesti toisella, istutuksen jälkeisellä kasvukaudella verrattuna korkeampiin mättäisiin (Heiskanen ja Saksa 2010). Hienojakoisilla moreenimailla Heiskanen ym. (2013) eivät kuitenkaan havainneet mineraalimaan paksuuden mättäessä tai mättään korkeuden vaikuttavan merkittävästi taimien kasvuun. Voi siis olla, että karkeampijakoisiin maihin verrattuna, hyväkään maanmuokkaus ei voi täysin poistaa tiiviin, hienojakoisen maan heikentävää vaikutusta taimien kasvuun (Heiskanen ym. 2013, Heiskanen ym. 2014).

Matalampiin mättäisiin taimi on myös helpompi istuttaa oikeaan istutussyvyyteen. Jotta taimi saisi vettä kuivinakin kausina, paakku olisi istutettava vähintään mättään

humuskerrokseen tai sen läpi (Laiho 1985, Mälikönen 2003, Luoranen ym.2012). Syvään istutettujen taimien onkin raportoitu säilyvän paremmin elossa kuin normaali syvyyteen tai pintaan istutettujen taimien (Saksa 2011).

1.1.6 Kuusentaimien pituuden mallinnus

Kuusen viljelytaimikon pituuskehityksen mallinnusta ovat Suomessa aiemmin tutkineet mm. Valkonen (1997, 2000), Saksa ym. (2005), Siipilehto (2006), Uotila ym. (2010) sekä Siipilehto ym. (2015). Malleissaan Siipilehto ym. (2015) mallinsivat sekä yksittäisen puun pituutta, että metsikkötasoista puun keskipituutta tulomuotoisilla malleilla, jotka linearisoitiin logaritmuunnoksen avulla. Myös Siipilehdon (2006) kuusen keskipituus linearisoitiin logaritmuunnoksen avulla. Kuusen paakkutaimien pituuskasvua on mallinnettu myös lineaarisilla sekamalleilla, joissa tarkasteltiin pituuskasvun vaihtelua eri hierarkiatasoilla (vuosi, uudistusala, ryväs, koeala, taimi) (Saksa ym.2005). Puuston pituuskehitystä on mahdollista mallintaa myös usean mallin yhdistelmällä. Valkonen (1997) kuvasi viljelykuusikon pituuskehitystä metsikön valtapituuskehityksen mallin ja yksittäisen puun pituuskasvumallin yhdistelmällä.

Tärkeitä selittäviä muuttujia puuston pituuskehitykselle ovat edellä mainituissa malleissa olleet mm. ikä, kasvupaikka ja lämpösumma. Näistä puiden ikää on lisäksi käytetty usein jonakin matemaattisena muunnoksena. Esimerkkinä Siipilehto (2006) käytti kuusen keskipituusmallissa muunnosta, $1/ikä$. Siipilehdon ym. (2015) malleissa ikä oli puolestaan muunnettu muotoon $1/(ikä+10)$. Saksa ym. (2005) puolestaan käyttivät kuusen pituuskasvumallissa ikää sekä muuntamattomana että korotettuna toiseen $(ikä)^2$.

Kasvupaikan hyvyttä on kuvattu kasvumalleissa Miinan (2001) mukaan mm. kasvupaikkatyyppillä, pituusboniteetilla, ojitustilanteella, soistuneisuudella, kivisyydellä, kasvukauden pituudella, lämpösummalla, korkeudella meren pinnasta, etäisyydellä merestä sekä leveys- ja pituusasteilla. Näistä Siipilehto (2006) käytti selittävinä muuttujina kuusen pituusmallissa kasvupaikkatyyppiä, lämpösummaa sekä kasvupaikan lisämääreitä (soistuneisuus sekä kivisyys). Lämpösumma kuvaa kasvupaikan hyvyyden lisäksi Suomessa myös alueellista kasvunvaihtelua, sillä lämpösumma ja potentiaalinen kasvu pienenevät pohjoiseen päin siirryttäessä (Miina 2001).

Lämpösumman ohella ilmastollisina selittäjinä on käytetty pituuden mallinnuksessa myös kasvukauden aikaista kuukauden keskilämpötilaa ja kasvukauden aikaista sadesummaa (Saksa ym. 2005). Alueellista kasvunvaihtelua on Suomessa kuvattu malleissa kasvupaikan sijainnilla (leveysaste) ja korkeudella merenpinnasta (Miina 2001). Mitä pohjoisempana ja korkeammalla meren pinnasta kasvupaikka sijaitsee, niin sitä huonompi on myös kasvu (Miina 2001).

Puiden välinen kilpailu voidaan kuvata malleissa puu- ja metsikkötunnuksista lasketuilla (biologisilla) kilpailutunnuksilla (Miina 2001). Käytettyjä kilpailutunnuksia ovat esimerkiksi olleet pohjapinta-ala, runkoluku sekä puun suhteellista kokoasemaa kuvaavat muuttujat kuten puun pituuden suhde metsikön keskipituuteen. Puun suhteellista kokoasemaa kuvaavista muuttujista on käytetty menestyksekkäästi myös puiden pituuskilpailua kuvaavaa lehtipuiden valtapituuden suhdetta kuusen valtapituuteen (Siipilehto ym. 2015).

Maanmuokkauksen vaikutusta taimien pituuskehitykseen ovat aiemmin tutkineet mm. Saksa ym. (2005), Uotila ym. (2010) ja Siipilehto ym. (2015). Saksan ym. (2005) sekä Uotilan ym. (2010) kokeissa maanmuokkauksen vaikutusta kuusen pituuskasvuun tutkittiin sekä äestetyillä että mätästetyillä uudistusaloilla. Siipilehdon ym. (2015) kokeessa maanmuokkausmenetelmistä oli mukana äestys, laikutus, mätästys sekä auraus. Tulokset näistä kokeista ovat vahvistaneet käsitystä mätästyksen eduista kuusta uudistettaessa sekä mätästyksen puiden pituuskehitystä nopeuttavasta vaikutuksesta.

Edellä mainituissa tutkimuksissa mätästystä ei kuitenkaan ole eritelty sen eri alalajeihin, vaan sitä on käsitelty yhtenä kokonaisuutena muiden maanmuokkausmenetelmien rinnalla. Kääntömätästettyjen kuusentaimikoiden pituuskehityksestä pidemmällä aikavälillä tiedetäänkin siten vielä melko vähän Suomen olosuhteissa. Kuusentaimien pituuskehityksen mallinnusta kääntömätästetyillä kohteilla ei myöskään ole aiemmin tehty Suomessa.

1.2 Työn tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tehdä pituusmallit kuvaamaan istutuskuusen pituuskehitystä 5-17-vuotiailla kääntömätästetyillä kuvioilla Pirkanmaalla ja Keski-Suomessa. Mallit laadittiin sekä metsikkö- (kuusen keskipituus) että puutasolla (kuusen pituus). Mallinnusmenetelmänä käytettiin lineaarista kovarianssianalyysiä. Empiirisenä aineistona mallien laadinnassa käytettiin vuoden 2015 elo- lokakuussa inventoitua maastoaineistoa sekä Ilmatieteen laitoksen ja Maanmittauslaitoksen paikkatietoaineistoja. Aineistoista tarkasteltiin kuusen pituuskasvuun vaikuttavia muuttujia ja valittiin parhaimmat kuusen pituutta sekä keskipituutta selittävät muuttujat lopullisiin malleihin. Selittävien muuttujien vaikutusta kuusen pituuskehitykseen tutkittiin ja samalla pyrittiin arvioimaan kääntömätästyksen soveltuvuutta erilaisille uudistusaloille. Kuusen keskipituuden mallia vertailtiin myös muihin jo olemassa oleviin kuusen keskipituusmalleihin.

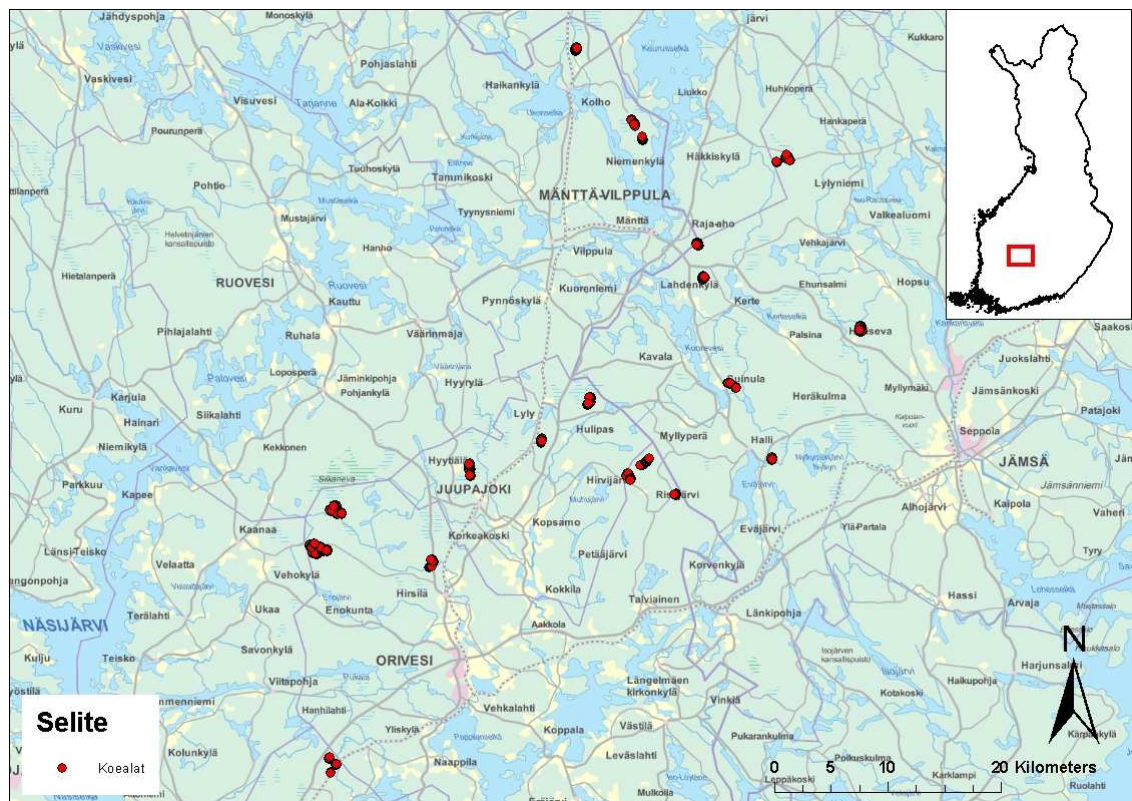
2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Maastoaineisto

2.1.1 Otanta

Kääntömätästyskuvioiden ositettu otanta:

Tutkimuksen kääntömätästetyt kuviot sijaitsivat Metsä Groupin osaomistaman Finsilva Oyj:n mailla Pirkanmaalla ja Keski-Suomessa (kuva 8). Kuviot valittiin tutkimukseen ositetulla otannalla siten, että uudistamisalan ikäluokkaan (istutusvuosi: 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011 ja 2013) saatiin seitsemän kuviota. Otannassa oli yhteensä siis 49 kääntömätästettyä kuviota. Ositettu otanta suoritettiin Metsä Groupin toimesta.



Kuva 8. Tutkimusalueen ja kääntömätästyskohteiden sijainti. Maanmittauslaitoksen Taustakartta.

Koealojen systemaattinen tasavälinen otanta:

Jokaiselta tutkimukseen valitulta kääntömätästyskuviolta otettiin koealoja systemaattisella tasavälisellä koealaotannalla. Koeala oli säteeltään 2,52 m ja pinta-alaltaan 20 m². Koeala- ja linjaväli valittiin kuvion koon mukaan siten, että alle 2,0 ha laajuisilta aloilta oli tavoitteena mitata 15 ja niitä suuremmilta aloilta 20 koealaa/kääntömätästyskuvio (Saksa ja Kankaanhuhta 2007). Tavoitteena oli kerätä koko kääntömätästyskuvion kattava ympyräkoelaverkosto. Maastossa koelaverkosto luotiin käyttäen apuna Garmin GPSMAP 64s -paikannuslaitetta, jolla sai ilmansuunnan ja koealavälin (m) määritettyä (kuva 9). Ensimmäinen koeala sijoitettiin satunnaiseen pisteeseen puolen koealavälin päähän uudistusalan reunasta.



Kuva 9. Garmin GPSMAP 64s- paikannuslaitetta käytettiin koealavälin ja suunnan määrittämisessä. Kuva: Jani Järvenpää.

2.1.2 Mittausten valmistelut

Ennen maastotöiden aloittamista Metsä Groupilta saatiin ositetulla otannalla valittujen kuvioden perustiedot (liite 1) sekä niiden sijaintitiedot paperikartoilla.

Maastotöiden valmistelut aloitettiin kuviotietojen ja kuviorajojen päivittämällä sähköiseen muotoon, siten että niitä pystyttäisiin käyttämään Garminin GPSMAP 64S-paikannuslaitteessa maastossa.

Kääntömätästettyjen kuvioden rajat digitoitiin QGIS 2.6 Brighton – ohjelmistolla ja ne siirrettiin Garminin-paikannuslaitteeseen GPX-formaatissa (.gpx), jolloin ne pystyttiin näkemään kuviorajoina. Digitoinnissa käytettiin apuna Maanmittauslaitoksen avoimeen dataan kuuluvia peruskarttoja sekä ortoilmakuvia. Ortoilmakuvilta havaitut säästöpuuryhmät ja kääntömätästämättä jääneet kohdat pyrittiin rajaamaan pois kuvioista digitointivaiheessa. Tämän johdosta monella kuviolla pinta-ala pienenenkin annetusta pinta-alasta. Pienentynyt pinta-ala huomioitiin koealaotannassa, jolloin koealaväliä pienennettiin vastaamaan digitoitua pinta-alaa.

Mittausten valmisteluihin kuului myös mittavälineiden hankinta ja käytännön mittausten suunnittelu. Pääosa mittausvälineistä saatiin lainaksi Helsingin yliopiston Hyytiälän metsäasemalta sekä niiden käyttöön opastus Hyytiälän aseman tutkimusteknikko Silja Pirttijärveltä. Taulukosta 1 käy ilmi maastomittauksissa käytetyt mittavälineet, mitattavakohde sekä mittalaitteen tarkkuus.

Taulukko 1: Mittausvälineet.

Mitattava kohde	Mittausväline	Mittalaitteen tarkkuus
Puun pituus (alle 5m)	Nestle telefix 5m- teleskooppimitta	1 mm
Puun pituus (yli 5m)	Haglöf Forestor Vertex - korkeusmittari	10 cm
Etäisyys puusta kun käytettiin Haglöf Forestor Vertex korkeusmittaria	Metsurinmitta (25m)	1 cm
Puun kantoläpimitta (alle 5cm)	Työntömitta	1 mm
Puun kantoläpimitta (yli 5 cm)	Mittasakset	1 mm
Maalaji	Maanäytekaira	
Koealan säde	Koealavapa (2,52 m)	
Koealan keskipisteen koordinaatit	Garmin GPSMAP 64S	3 m

2.1.3 Koeala mittaukset

Mittaukset suoritettiin vuoden 2015 elo- lokakuun aikana ja ne kirjattiin maastolomakkeelle (liite 2). Jokaiselta koealalta määritettiin seuraavat asiat:

- Koealan keskipisteen koordinaatit WGS84-koordinaattijärjestelmässä
- GPS-tarkkuus (m)
- Kasvupaikka: Lehto, OMT, MT, VT, CT, CLT
- Kasvupaikan lisämääre: ei lisämäärettä, kivinen, soistunut
- Maalaji: Hieno, Keskikarkea, Karkea, Turve
- Metsänhoidollinen käsittely: ei käsittelyä, käsitelty
- Hallavauriot koealalla: on, ei ole
- Istutus puulajin (kuusi): lukumäärä (kpl), koepuun pituus (m), koepuun kantoläpimitta (cm), paksuimman puun pituus (m)
- Luontaisen lehtipuuston: lukumäärä (kpl), paksuimman puun pituus (m)
- Luontaisen männyn: lukumäärä (kpl), paksuimman puun pituus (m)

Koealan keskipisteen koordinaatit kerättiin Garminin GPSMAP 64S - paikannuslaitteella ja tallennettiin.

Kasvupaikka määritettiin kivennäismaiden metsätyypiluokituksen mukaan.

1. Lehto
2. Lehtomainen kangas (OMT)
3. Tuore kangas (MT)
4. Kuivahko kangas (VT)
5. Kuiva kangas (CT)
6. Karukkokangas (CIT)

Kasvupaikan määrittämisessä apuna käytettiin tietoa edellisestä puulajista ja kantojen koosta/kasvunopeudesta sekä kasvupaikan tyyppikasvillisuudesta. Turvemaiden turvekangastyypit rinnastettiin vastaavaan kivennäismaiden metsätyyppiin.

Kasvupaikan lisämääre merkittiin, mikäli kasvuolosuhteet olivat heikentyneet kivisyyden tai soistuneisuuden seurauksena. **Kivisyydellä** kuvataan puuntuotoskyvyn

heikentymistä kivisyyden takia. Kivisyys vaikuttaa heikentävästi myös muokkausjälkeen sekä viljelytiheyteen (Saksa ja Kankaanhuhta 2007).

Soistuneisuudella kuvataan, että puuntuotoskyky on heikentynyt liiallisen märkyyden takia. Liiallista soistuneisuutta indikoi esim. rahkasammallajikkeiden runsas esiintyminen (Saksa ja Kankaanhuhta 2007).

Maalajin määrittystä varten otettiin maanäyte humuskerroksen alta n. 15–30 cm syvyydeltä. Maanäyte otettiin maanäytekairalla koealan keskipisteestä tai sen välittömästä läheisyydestä koealalla. Näytteestä määritettiin pääasiallisin maalajite sormilla ja silmillä tehtävän analyysin perusteella (kuva 10). Koeala luokiteltiin turvemaaksi, jos turpeen paksuus ylitti 20 cm.

Maalajin luokittelu (Saksa ja Kankaanhuhta 2007) mukaan:

1. Karkea (soramoreeni, lajittunut sora ja hiekka)
 - raekoko silmin arvioitavissa
2. Keskikarkea (hiekkamoreeni ja hietamoreeni; karkea hieta)
3. Hieno (hiesumoreeni ja savimoreeni; hieno hieta, hiesu ja savi)
 - rakeita ei voi erottaa paljain silmin, pyörityskoe
 - routiva maalaji, rousteen merkkejä muokkausjäljessä
4. Turve



Kuva 10. Maalajin määrittys tehtiin maastossa aistinvaraisesti neljään luokkaan. Kuva: Jani Järvenpää.

Metsänhoidollinen käsittely määritettiin koealalla esiintyvien hoitotyönjälkien (kannot, kaadetut puut, taimikon kehitysvaihe) perusteella. Tehdyistä maanmuokkaus- ja metsänhoitotoista saatiin myös tieto Metsä Groupilta.

Hallavauriot koealalla määritettiin koealan kuusien hallavaurioiden (paleltuneet versot ja typistynyt pituuskasvu) esiintyvyyden perusteella.

Kuusen lukumäärä, kuusen pituus ja kantoläpimitta

Kuusien lukumäärä määritettiin koealalta siten, että mukaan luettiin kaikki istutetut/luontaisesti syntyneet kuusentaimet, jotka olivat vähintään 50 % koealan keskipistettä lähimmän istutuskuusen (koepuu) pituudesta silmämääräisesti arvioituna. Mukaan laskettavien taimien tuli olla elinvoimaisia ja sijaita vähintään 30cm:n etäisyydellä toisistaan. Jos koealalla ei ollut yhtään tervettä ja kasvatuskelpoista istutuskuusta niin tällöin koealaa siirrettiin linjalla eteenpäin seuraavalle koealalle osuvan istutustaimen luo.

Kuusen pituus mitattiin koealan keskipistettä lähimmästä mättääseen istutetusta terveestä taimesta (koepuu) sekä silmämääräisesti arvioidusta koealan paksuimmasta kuusesta. Pituus määritettiin 1 cm tarkkuudella alle 5m mittaisista puista käyttäen Nestlen telefix 5m mittaustankoa (kuva 11). Yli 5 m pituisten puiden pituus mitattiin Haglöf Forestor Vertex pituusmittarilla 6 m päästä mitattavasta puusta, laitteen 10 cm antamalla tarkkuudella.

Koepuusta (kuusi) mitattiin myös kantoläpimitta n.17 cm korkeudelta mättään/maanpinnasta. Alle 5cm kantoläpimitat mitattiin työntömitalla (kuva 12). Yli 5cm kantoläpimitat mitattiin metallisilla mittasaksilla. Käytetty tarkkuus kantoläpimitassa oli 0,5 cm.



Kuva 11. Kuusen pituuden mittausta Nestlen telefix 5m mittaustangolla.
Kuva: Jani Järvenpää.



Kuva 12. Kuusen kantoläpimitan mittausta työntömitalla. Kuva: Jani Järvenpää.

Luontaisen lehtipuuston lukumäärä ja paksuimman lehtipuun pituus

Luontaisen lehtipuuston lukumäärä määritettiin siten, että mukaan luettiin ne lehtipuiden taimet, jotka olivat vähintään 50 % koealan keskipistettä lähimmän kuusen (koepuu) pituudesta silmämääräisesti arvioituna. Lisäksi mukaan luettavien taimien tuli olla vähintään 30cm:n etäisyydellä muista lehtipuiden taimista.

Koealan paksuin lehtipuu arvioitiin silmämääräisesti ja sen tuli olla vähintään 50 % koealan keskipistettä lähimmän kuusen (koepuu) pituudesta. Pituus lehtipuusta mitattiin kuten kuusen pituus edellä.

Luontaisen männyn lukumäärä ja paksuimman männyn pituus

Luontaisen männyn lukumäärä määritettiin siten, että mukaan luettiin ne männyn taimet, jotka olivat vähintään 50 % koealan keskipistettä lähimmän kuusen (koepuu) pituudesta silmämääräisesti arvioituna. Lisäksi mukaan luettavien taimien tuli olla vähintään 30cm:n etäisyydellä muista männyn taimista.

Koealan paksuin mänty arvioitiin silmämääräisesti ja sen tuli olla vähintään 50 % koealan keskipistettä lähimmän kuusen (koepuu) pituudesta. Pituus männystä mitattiin kuten kuusen pituus edellä.

2.2 Paikkatietoaineisto

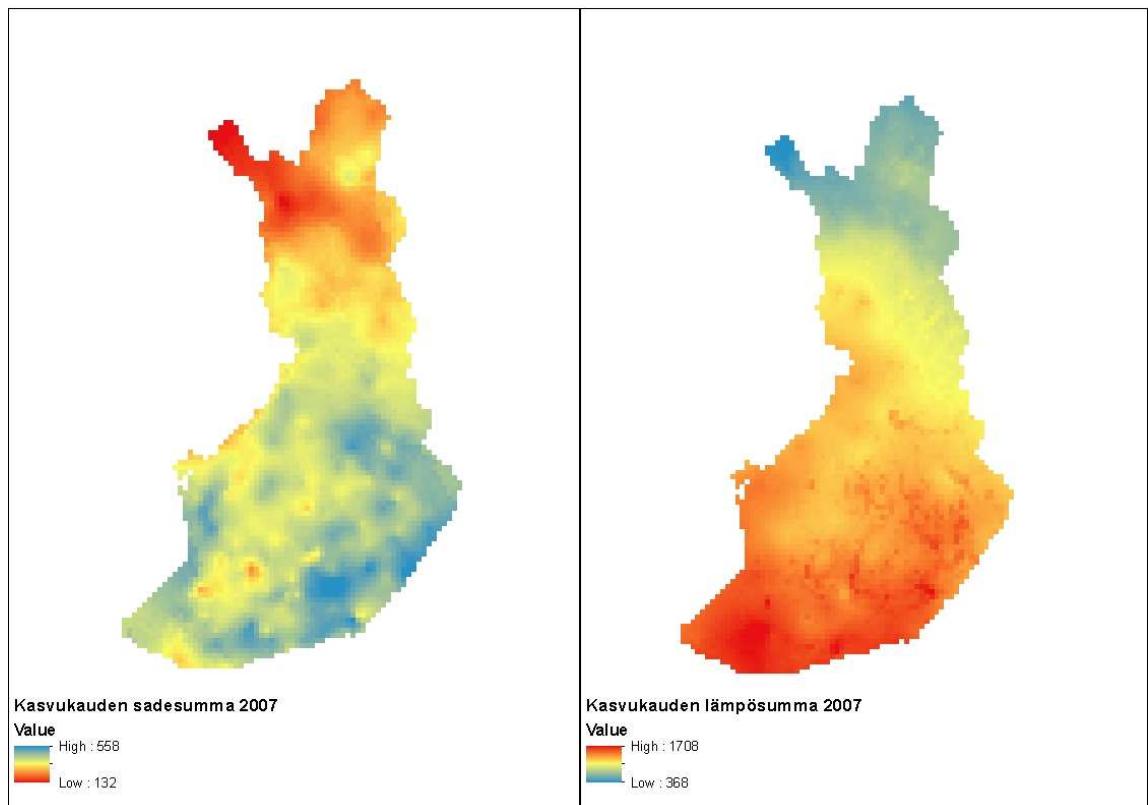
2.2.1 Aineistot

Paikkatietoaineistoista (taulukko 2) laadittaviin malleihin tuotiin selittäviä muuttujia maastoaineiston rinnalle. Ilmatieteen laitoksen lämpösumma- ja sadesumma aineistoa (kuva 13) hyödynnettiin sekä yksittäisen puun pituuden, että keskipituuden malleissa. Maanmittauslaitoksen korkeusmallia (2m) (kuva 14) sekä siitä johdettuja selittäjiä taas hyödynnettiin yksittäisen puun pituuden mallinnuksessa.

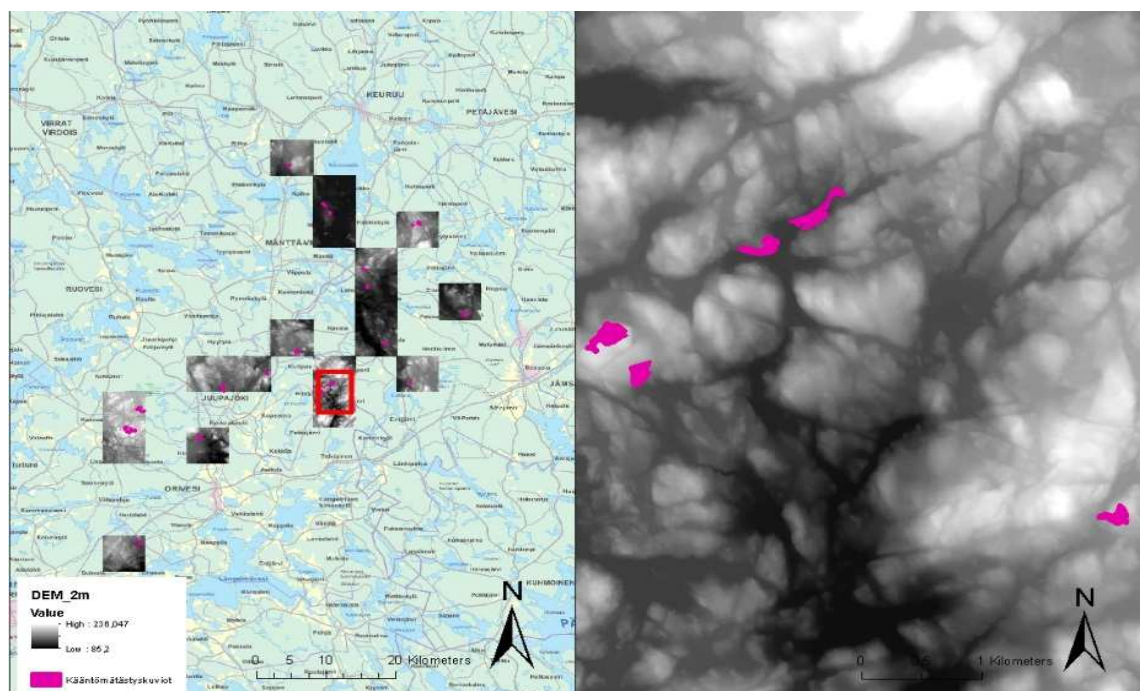
Käytetyistä aineistoista Maanmittauslaitoksen aineisto oli avointa ja Ilmatieteen laitoksen aineisto luvanvaraista.

Taulukko 2. Käytetyt paikkatietoaineistot.

Aineisto	Selite	Aineiston lähde	Aineiston laatu
Koealat	Koealojen sijaintitiedot	Maasto	Vektori (point)
Korkeusmalli	Maaston korkeusmalli	Maanmittauslaitos	Rasteri (2m)
Sadesumma 2001-2015	Kasvukauden aikana kertynyt sadesumma (mm)	Ilmatieteen laitos	Rasteri (10km)
Lämpösumma 2001-2015	Tehoisa lämpösumma (°Cvrk)	Ilmatieteen laitos	Rasteri (10km)



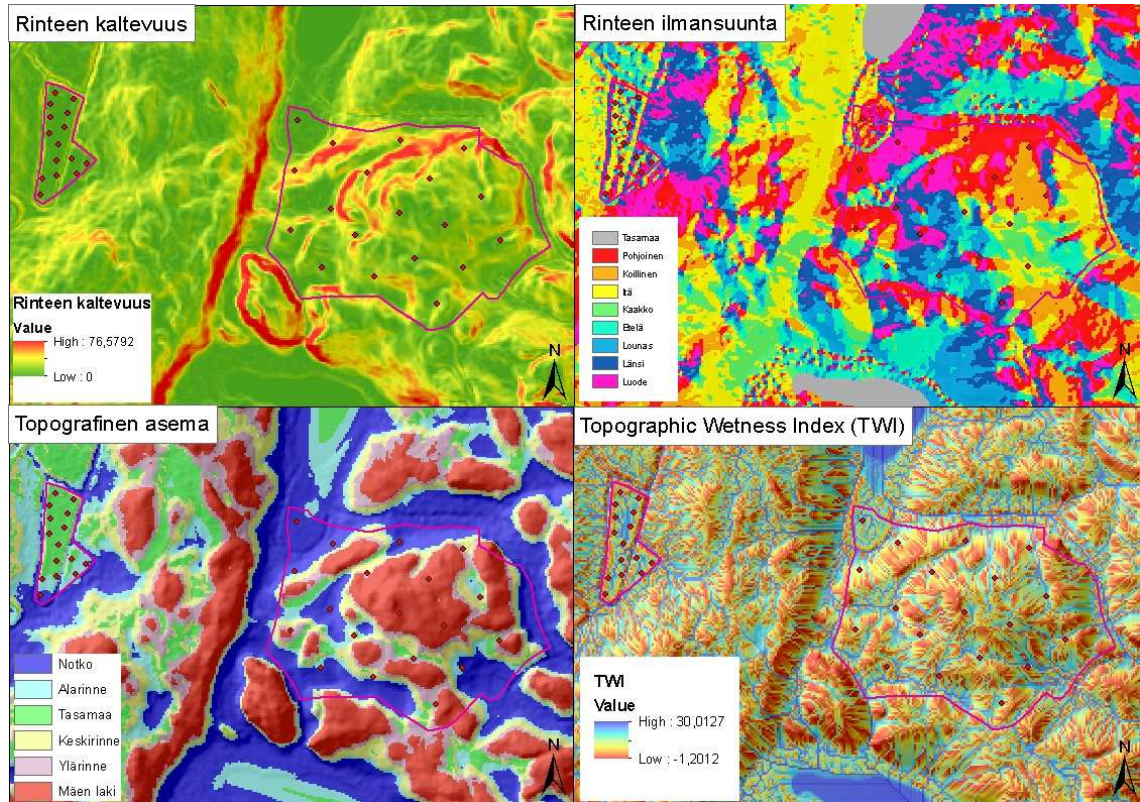
Kuva 13. Ilmatieteen laitoksen sadesumma (mm) - ja lämpösumma (°Cvrk) -aineistot (kuvassa vuoden 2007 aineisto). Ilmatieteen laitokselta saatiin vuosien 2001–2015 aineistot, joista koealoille ja kuvioille laskettiin toteutunut sade- ja lämpösumma taimien istutuksen jälkeen.



Kuva 14. Maanmittauslaitoksen korkeusmalli 2m (engl. Digital Elevation Model, DEM). Korkeusmallit (yht.18 tiedostoa) ladattiin maanmittauksen avoimien aineistojen tiedostopalvelusta.

2.2.2 Paikkatietoanalyysit

Maanmittauslaitoksen korkeusmallilla tehtiin neljä analyysiä koskien maaston topografiaa (kuva 15 ja 16). Analyysissä käytettiin ArcGIS 10.2 – ohjelmistoa.



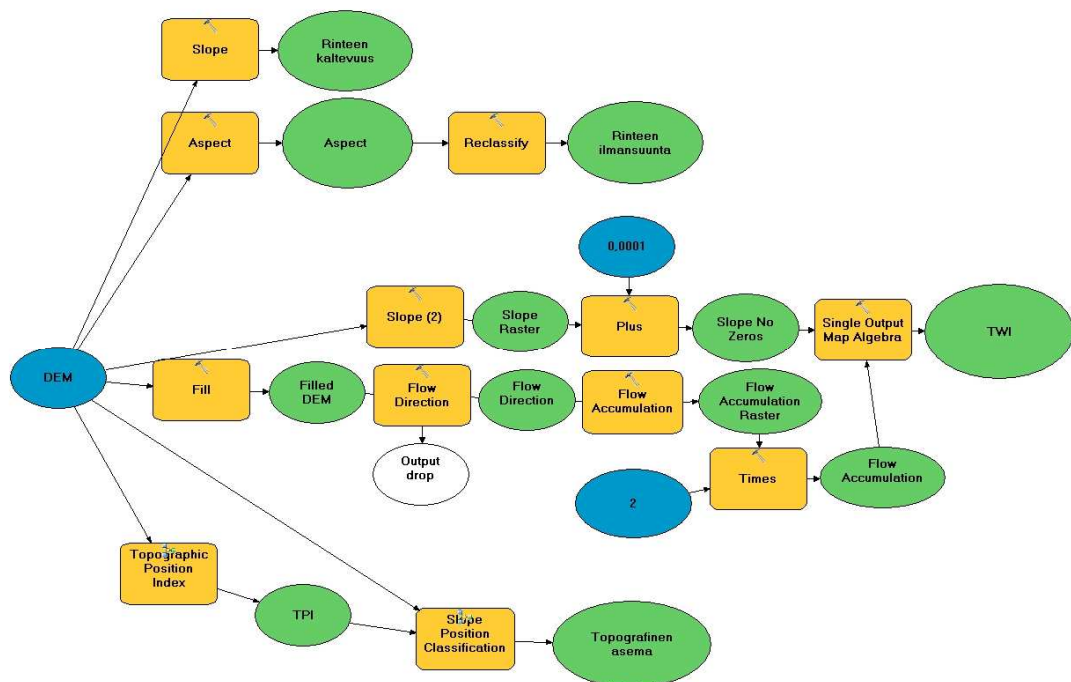
Kuva 15. Korkeusmallista johdetut rasteritasot.

Spatial Analyst Tools-työkalupaketin työkalulla ”Slope” laskettiin rasterihiloille **rinteen kaltevuus** asteina ja työkalulla ”Aspect” laskettiin rasterihilan **ilmansuunta** (asteina). Ilmansuunta luokiteltiin laskennan jälkeen vielä kahdeksaan ilmansuuntaluokkaan ”Reclassify”-työkalulla.

Rasterihilan **topografinen asema** laskettiin ”Slope Position Classification” -työkalulla, joka kuuluu Topography Tools- työkalupakettiin (Dilts 2016). Kyseisen työkalupaketin voi ladata verkosta ilmaiseksi ArcGIS-ohjelmaan käytettäväksi. Slope position classification- työkalulla maasto luokiteltiin kuuteen topografiaa kuvaavaan luokkaan (Jenness Enterprises 2016). Topografisen aseman luokitus perustui maastonkorkeusmalliin (DEM) sekä topografisen aseman indeksiin (Topographic position index, TPI) (Jenness Enterprises 2016). TPI laskettiin myös Topography Tools

– työkalupaketin työkalulla. TPI:n laskennassa neighborhood-metodina oli ”annulus” sisäsäteellä 0 m ja ulkosäteellä 50 m.

Topographic Wetness Index (TWI) (Beven & Kirkby, 1979), kuvaa maaston vesipitoisuutta valuma-alueen ja rinteiden jyrkkyyden suhteen. Sen on havaittu aiemmissa tutkimuksissa selittävän puiden kasvua (Byun ym. 2013, Adams ym. 2014, Mohamedou ym. 2014). Tässä tutkimuksessa TWI laskettiin rasterihilalle Mohamedou ym. (2014) kuvailemalla tavalla.



Kuva 16. Prosessikaavio korkeusmallilla (DEM) tehdyistä paikkatietoanalyysistä. Kaavio laadittu ArcGIS ModelBuilderillä.

Ilmatieteen laitoksen aineistoilla ei tehty paikkatietoanalyyskejä.

Lopuksi Ilmatieteen laitoksen vuosittaisen lämpö- ja sadesummadatan sekä Maanmittauslaitoksen korkeusmallin ja siitä johdettujen tasojen ominaistiedot tuotiin koealoille. Tähän käytettiin ”**Extract Multi Values to Points**”- työkalua, jolla koealojen keskipisteiden sijaintitietoa vastaavat rasterihilan ominaistiedot irrotettiin koealoille ja siten edelleen SPSS-ohjelmistoon hyödynnettäväksi.

2.3 Aineiston valmistelut analyysiin

Pääosa tämän tutkimuksen selittävästä muuttujista valittiin pohjautuen sekä aiempiin malleihin että läpi käytyyn kirjallisuuteen. Toisaalta osaa tässä tutkimuksessa esiintyvistä muuttujista ei aiemmin oltu käytetty selittämään kuusen pituutta ja niiden selityskykyä selvitetiin puun pituusmallinnuksessa ensimmäistä kertaa. Tällaisia selittäjiä olivat esimerkiksi paikkatietoaineistoon perustuvat rinteen kaltevuus, rinteen ilmansuunta sekä topografinen asema. Myös maanmuokkauksen ajoituksen suhdetta istutukseen ei aiemmin oltu tutkittu puun pituuden mallinnuksessa.

Aineisto valmisteltiin analyysyä varten koodaamalla luokittelu- ja järjestystason muuttujat numeeriseen muotoon, esim. Kasvupaikka: 1=Lehto, 2=OMT, 3=MT, 4=VT. Samoin koealojen kivisyys, soistuneisuus, halla ja taimikonhoito koodattiin ns. dummy-muuttujiksi. Dummy-muuttuja saa arvon 1, kun muuttuja on tosi ja arvon 0, kun se on epätosi.

Ilmatieteen laitoksen vuosittaisista datoista 2001–2015 laskettiin koealoille toteutunut tehoisa lämpösumma ($^{\circ}\text{Cvrk}$) sekä toteutunut kasvukauden aikainen sadesumma (mm), jonka koealan taimet olivat keskimäärin saaneet istuttamisensa jälkeen. Täten esim. vuonna 2013 istutetun taimen tehoisa lämpösumma laskettiin siis vuosien 2013, 2014 ja 2015 lämpösummien keskiarvona. Laskenta suoritettiin Microsoft Office Excel 2013-ohjelmalla. Lämpösumman ja sadesumman laskennan jälkeen saatiin koealoja koskeva aineisto valmiiksi (taulukko 3 ja taulukko 4).

Metsikkötason keskipituusmallia varten koealojen tiedot laskettiin vielä koskemaan yksittäisiä kääntömätästyskuvioita. Nämä kuviokohtaiset muuttujat laskettiin käytännössä siten, että luokittelumuuttujista otettiin kuvion koealojen moodiarvo (aineistossa useimmin esiintyvä arvo) sekä numeerisista muuttujista laskettiin aritmeettinen keskiarvo. Näin saatiin metsikkötason malliin myös kuviokohtainen aineisto (taulukko 5 & taulukko 6).

Taulukko 3. Koealakohtaisten luokittelumuuttujien määrät ja jakautuminen. Ist_v=Mujuk_v on istutuksen ja muokkauksen ajoitusta kuvaava muuttuja, joka saa arvon 0, kun muokkaus on tehty istutusta edeltävänä vuonna ja arvon 1, kun muokkaus on tehty istutusvuonna. Thoitto arvolla 1 on hoidetut taimikkokohteet.

Categorical Variable Information			N	Percent
Factor	Kasvupaikka	OMT	317	37,2%
		MT	457	53,6%
		VT	79	9,3%
		Total	853	100,0%
	Maalaji	Karkea	36	4,2%
		Keskikarkea	232	27,2%
		Hieno	432	50,6%
		Turve	153	17,9%
	Soistuneisuus	Total	853	100,0%
		0	778	91,2%
		1	75	8,8%
		Total	853	100,0%
	Kivisyys	0	695	81,5%
		1	158	18,5%
		Total	853	100,0%
	Halla	0	730	85,6%
		1	123	14,4%
		Total	853	100,0%
	Ilmansuunta	Pohjoinen	92	10,8%
		Koillinen	98	11,5%
		Itä	97	11,4%
		Kaakko	120	14,1%
		Etelä	86	10,1%
		Lounas	129	15,1%
		Länsi	124	14,5%
		Luode	107	12,5%
		Total	853	100,0%
	Topo_asema	Notko	99	11,6%
		Alarinne	117	13,7%
		Tasamaa	360	42,2%
		Keskirinne	113	13,2%
		Ylärinne	66	7,7%
		Mäen laki	98	11,5%
	Ist_v = Muok_v	Total	853	100,0%
		0	412	48,3%
		1	441	51,7%
		Total	853	100,0%
	Thoitto	0	563	66,0%
		1	290	34,0%
		Total	853	100,0%

Taulukko 4. Koealakohtaiset otostunnusluvut. H on kuusen pituus (m), T on kuusen biologinen ikä, D on kuusen kantoläpimitta (cm), Hdom on kuusen valtapituus (m), Ku_rl on kuusen runkoluku (kpl/ha), MäHdom on männyn valtapituus (m), Mä_rl on männyn runkoluku (kpl/ha), LeHdom on lehtipuun valtapituus (m), Le_rl on lehtipuiden runkoluku (kpl/ha), rl on kokonaisrunkoluku (kpl/ha), LeHdom/Hdom on lehtipuiden valtapituus jaettuna kuusen valtapituudella, Prec_sum on sadesumma kasvukaudella (mm), LS on tehoisa lämpösumma (°Cvrk), Elevation on korkeus merenpinnasta (m), kaltevuus on rinteen kaltevuus asteina ja TWI on Topographic Wetness Index.

Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
H	853	,26	9,70	2,5452	1,79792
T	853	5	17	11,09	3,985
D	853	,5	17,0	3,948	2,6945
Hdom	853	,26	9,80	3,0435	2,00065
Ku_rl	853	500	8000	1878,08	882,352
MäHdom	853	,00	8,50	,8609	1,49618
Mä_rl	853	0	6000	410,90	751,937
LeHdom	853	,00	10,40	2,0894	1,85923
Le_rl	853	0	32000	4988,28	6055,192
rl	853	500	33500	7277,26	6265,186
LeHdom / Hdom	853	,00	6,05	1,0590	,95457
Prec_sum	853	310,0	389,6	364,532	21,0908
LS	853	1284,7	1392,3	1327,685	24,1281
Elevation	853	110,3	198,1	148,346	22,5256
Kaltevuus	853	,1	32,4	4,921	4,7286
TWI	853	1,43	13,21	4,8018	2,12065
Valid N (listwise)	853				

Taulukko 5. Metsikkökohtaisten luokittelumuuttujien määrät ja jakautuminen. Ist_v=Muk_v on istutuksen ja muokkauksen ajoitusta kuvaava muuttuja, joka saa arvon 0, kun muokkaus on tehty istutusta edeltävänä vuonna ja arvon 1, kun muokkaus on tehty istutusvuonna. Thoito arvolla 1 on taimikonhoidetut kohteet.

Categorical Variable Information			N	Percent
Factor	Kasvupaikka	OMT	19	38,8%
		MT	27	55,1%
		VT	3	6,1%
		Total	49	100,0%
	Maalaji	Karkea	1	2,0%
		Keskikarkea	13	26,5%
		Hieno	26	53,1%
		Turve	9	18,4%
		Total	49	100,0%
	Soistuneisuus	0	47	95,9%
		1	2	4,1%
		Total	49	100,0%
	Kivisyys	0	43	87,8%
		1	6	12,2%
		Total	49	100,0%
	Halla	0	44	89,8%
		1	5	10,2%
		Total	49	100,0%
	Ist_v = Muk_v	0	24	49,0%
		1	25	51,0%
		Total	49	100,0%
	Thoito	0	33	67,3%
		1	16	32,7%
		Total	49	100,0%

Taulukko 6. Metsikkökohtaiset otostunnusluvut. H_μ on kuusen keskipituus (m), T on kuusen biologinen ikä, D on kuusen kantoläpimitta (cm), H_{dom} on kuusen valtapituus (m), Ku_{rl} on kuusen runkoluku (kpl/ha), MäH_{dom} on männyn valtapituus (m), Mä_{rl} on männyn runkoluku (kpl/ha), LeH_{dom} on lehtipuun valtapituus (m), Le_{rl} on lehtipuiden runkoluku (kpl/ha), rl on kokonaisrunkoluku (kpl/ha), LeH_{dom}/H_{dom} on lehtipuiden valtapituus jaettuna kuusen valtapituudella, Prec_{sum} on sadesumma kasvukaudella (mm) ja LS on tehoisa lämpösumma (°Cvrk).

Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
H _μ	49	,47	6,10	2,5119	1,60409
T	49	5	17	11,00	4,041
D	49	,8	8,9	3,879	2,3555
H _{dom}	49	,57	7,36	3,0058	1,85798
Ku _{rl}	49	1132	3033	1894,00	452,708
MäH _{dom}	49	,00	6,27	1,9297	1,57571
Mä _{rl}	49	0	1452	399,69	412,765
LeH _{dom}	49	,00	5,98	2,9999	1,53091
Le _{rl}	49	0	19000	5183,16	4647,408
rl	49	1566	20941	7476,86	4790,512
LeH _{dom} / H _{dom}	49	,00	2,68	1,2152	,54273
Prec _{sum}	49	310,0	389,6	364,001	21,5414
LS	49	1284,7	1392,3	1327,175	24,5664
Valid N (listwise)	49				

2.4 Aineiston analyysi

Aineisto analysoitiin sekä metsikkö- että puutasolla. Eri mallivaihtoehtoja testattaessa päädyttiin käyttämään kuusen taimien keskipituudelle (H_μ) sekä yksittäisen kuusen pituudelle (H) tulomuotoista mallia kuten Siipilehto ym. (2015). Kuusen taimien metsikkötason keskipituuden malli linearisoitiin siten logaritmuunnoksella yhtälön (1) mukaiseksi.

$$\ln(H_\mu) = \beta_0 + \beta_1 1/(T+10) + \beta_2 \text{Kasvupaikka} + \beta_3 \text{Maalaji} + \beta_4 \text{Soistuneisuus} + \beta_5 \text{Kivisyys} + \beta_6 \text{Halla} + \beta_7 \text{Mä_rl} + \beta_8 \text{Le_rl} + \beta_9 \text{LeHdom/Hdom} + \beta_{10} \text{Ist_v} = \text{Muok_v} + \beta_{11} \text{Thoito} + \beta_{12} \text{Prec_sum} + \beta_{13} \text{LS} + e \quad (1)$$

Metsikkötason mallissa H_μ on selitettävä kuusen taimien keskipituus, $\beta_0 - \beta_{13}$ ovat mallin estimoitavat parametrit ja e on jäännösvirhe mallissa. Metsikkötason mallissa tarkasteltujen selittävien muuttujien tarkempi kuvaus löytyy taulukosta 7. Metsikkötasolla tarkastelu sisälsi 49 metsikköä.

Taulukko 7. Kuusen taimien keskipituuden testatut selittävät muuttujat metsikkötason mallissa.

Tunnus	Selite	Muunnos mallissa	Aineiston lähde	Muuttujan laji	Muuttujan mitta-asteikko
T	Istutustaimien (kuusi) ikä vuosina. Taimien oletettu olleen 2v istuttaessa	$1/(T+10)$	Metsä Group	Numeerinen	Suhdeasteikko
Kasvupaikka	1=Lehto, 2=OMT, 3=MT, 4=VT		Maasto	Luokittelu	Järjestysasteikko
Maalaji	1=karkea, 2=Keskikarkea, 3=Hieno, 4=Turve		Maasto	Luokittelu	Luokka-asteikko
Soistuneisuus	0=Ei soistunut, 1=Soistunut		Maasto	Luokittelu	Luokka-asteikko
Kivisyys	0=Ei kivinen, 1=Kivinen		Maasto	Luokittelu	Luokka-asteikko
Halla	0=Ei hallavaurioita, 1=Hallavaurioita		Maasto	Luokittelu	Luokka-asteikko
Mä_rl	Männyn keskimääräinen runkoluku kuviolla (kpl/ha)	$\text{Mä_rl}/1000$	Maasto	Numeerinen	Suhdeasteikko
Le_rl	Lehtipuun keskimääräinen runkoluku kuviolla (kpl/ha)	$\text{Le_rl}/1000$	Maasto	Numeerinen	Suhdeasteikko
LeHdom/Hdom	Paksuimman lehtipuun pituuden suhde paksuimman kuusen pituuteen (koealojen keskiarvo kuviolla)		Maasto	Numeerinen	Suhdeasteikko
Ist_v=Muok_v	0=maanmuokkaus istutusta edeltävänä vuotena, 1=maanmuokkaus istutusvuotena		Metsä Group	Luokittelu	Luokka-asteikko
Thoito	0=Hoitamaton, 1=Varhaisperkaus/taimikonhoito tehty		Metsä Group	Luokittelu	Luokka-asteikko
Prec_sum	Kuvion keskimääräinen toteutunut sadesumma kasvukausina (mm). Laskettu vuosien 2001–2015 sadesumma datasta istutusajankohta huomioiden		Ilmatieteen laitos	Numeerinen	Suhdeasteikko
LS	Kuvion keskimääräinen toteutunut tehoisa lämpösumma ($^{\circ}\text{Cvrk}$). Laskettu vuosien 2001–2015 lämpösumma datasta istutusajankohta huomioiden		Ilmatieteen laitos	Numeerinen	Suhdeasteikko

Yksittäisen kuusen pituudelle malli linearisoitiin logaritmimuunnoksella yhtälön (2) mukaisiksi.

$$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 1/(T+10) + \beta_2 \text{Kasvupaikka} + \beta_3 \text{Maalaji} + \beta_4 \text{Soistuneisuus} + \beta_5 \text{Kivisyys} + \beta_6 \text{Halla} + \beta_7 \text{Mä_rl} + \beta_8 \text{Le_rl} + \beta_9 \text{LeHdom/Hdom} + \beta_{10} \text{Ist_v=Muok_v} + \beta_{11} \text{Thoito} + \beta_{12} \text{Prec_sum} + \beta_{13} \text{LS} + \beta_{14} \text{Elevation} + \beta_{15} \text{Kaltevuus} + \beta_{16} \text{Ilmansuunta} + \beta_{17} \text{Topo_asema} + \beta_{18} \text{TWI} + e \quad (2)$$

Puutason mallissa H on selitettävä kuusen taimen pituus, $\beta_0 - \beta_{16}$ ovat mallin estimoitavat parametrit ja e on jäännösvirhe mallissa. Puutason mallissa tarkasteltujen selittävien muuttujien tarkempi kuvaus käy ilmi taulukosta 8. Puukohtainen tarkastelu sisälsi 853 koealaa (koepuuta).

Taulukko 8. Kuusen taimien pituuden testatut selittävät muuttujat puutason mallissa.

Tunnus	Selite	Muunnos mallissa	Aineiston lähde/(taso)	Muuttujan laji	Muuttujan mitta-asteikko
T	Istutustaimien (kuusi) ikä vuosina. Taimien oletettu olleen 2v istuttaessa	$1/(T+10)$	Metsä Group (Metsikkö)	Numeerinen	Suhdeasteikko
Kasvupaikka	1=Lehto, 2=OMT, 3=MT, 4=VT		Maasto (Koeala)	Luokittelu	Järjestysasteikko
Maalaji	1=karkea, 2=Keskikarkea, 3=Hieno, 4=Turve		Maasto (Koeala)	Luokittelu	Luokka-asteikko
Soistuneisuus	0=Ei soistunut, 1=Soistunut		Maasto (Koeala)	Luokittelu	Luokka-asteikko
Kivisyys	0=Ei kivinen, 1=Kivinen		Maasto (Koeala)	Luokittelu	Luokka-asteikko
Halla	0=Ei hallavaurioita, 1=Hallavaurioita		Maasto (koeala)	Luokittelu	Luokka-asteikko
Mä_rl	Männyn runkoluku koealalla (kpl/ha)	Mä_rl/1000	Maasto (Koeala)	Numeerinen	Suhdeasteikko
Le_rl	Lehtipuun runkoluku koealalla (kpl/ha)	Le_rl/1000	Maasto (Koeala)	Numeerinen	Suhdeasteikko
LeHdom/Hdom	Koealan paksuimman lehtipuun pituuden suhde koealan paksuimman kuusen pituuteen (Lehtipuiden pituuskilpailu)		Maasto (Koeala)	Numeerinen	Suhdeasteikko
Ist_v=Muok_v	0=maanmuokkaus istutusta edeltävänä vuotena, 1=maanmuokkaus istutusvuotena		Metsä Group (Metsikkö)	Luokittelu	Luokka-asteikko
Thoito	0=Hoitamaton, 1=Varhaisperkaus/taimikonhoito tehty		Metsä Group (Metsikkö)	Luokittelu	Luokka-asteikko
Prec_sum	Koealan keskimääräinen toteutunut sadesumma kasvukausina (mm). Laskettu vuosien 2001–2015 sadesumma datasta istutusajankohta huomioiden		Ilmatieteen laitos (10x10 km, rasteri)	Numeerinen	Suhdeasteikko
LS	Koealan keskimääräinen toteutunut tehoisa lämpösumma (°Cvrk). Laskettu vuosien 2001–2015 lämpösumma datasta istutusajankohta huomioiden		Ilmatieteen laitos (10x10 km, rasteri)	Numeerinen	Suhdeasteikko
Elevation	Korkeus merenpinnasta (m)		MML (2x2 m, rasteri)	Numeerinen	Suhdeasteikko
Kaltevuus	Rinteen kaltevuus (asteina)		ArcGIS laskenta(2x2 m, rasteri)	Numeerinen	Suhdeasteikko
Ilmansuunta	Rinteen ilmansuunta: 1=Tasamaa, 2=Pohjoinen, 3=Koillinen, 4=Itä, 5=Kaakko, 6=Etelä, 7=Lounas, 8=Länsi, 9=Luode		ArcGIS laskenta(2x2 m, rasteri)	Luokittelu	Luokka-asteikko
Topo_asema	Topografinen asema: 1=Notko, 2=Alarinne, 3=Tasamaa, 4=Keskirinne, 5=Ylärinne, 6=Mäen laki		ArcGIS laskenta(2x2 m, rasteri)	Luokittelu	Luokka-asteikko
TWI	Topographic Wetness Index. Maaston vesipitoisuutta kuvaava indeksiarvo		ArcGIS laskenta(2x2 m, rasteri)	Numeerinen	Suhdeasteikko

Malleissa, joissa selitettävä muuttuja on logaritimuunnettu kuten $\ln(H_\mu)$ ja $\ln(H)$, ovat estimoidut vaikutukset silloin myös suhteellisia kertoimia. Tällöin logaritimuunnettu pituuden ennustearvo saa myös aina positiivisen arvon, mikä on mallien loogisuuden kannalta hyvä ominaisuus (Siipilehto ym. 2015).

Molemmat luodut mallit sovitettiin SPSS-ohjelmistolla. Mallit estimoitiin SPSS:n Generalized linear models –proseduurilla käyttäen mallien linkkirakenteena logaritmista log-linkkiä ja jakaumaoletuksena normaalijakaumaa.

Mallien sovittaminen tehtiin siten, että ensimmäisessä vaiheessa estimoitiin ns. täysi malli, jossa kaikki selittävät muuttujat olivat mukana. Tämän jälkeen huonosti pituutta selittäviä muuttujia alettiin poistaa yksi kerrallaan siten, että kussakin vaiheessa poistetaan se selittäjä, jonka vastaava p-arvo on kaikkein suurin (ei-merkittävä muuttuja). Kyseisestä muuttujien karsintamenetelmästä Ranta (2002) käyttää nimitystä ”Taaksepäin askeltava regressioanalyysi” (engl. backward elimination). Kun mallista oli poistettu lopuksi kaikki ei-merkittävät selittävät muuttujat, niin saatiin luotua lopullinen käytettävä malli.

Luotuja malleja arvioitiin puun pituuden/keskipituuden estimaattien keskineliövirheen neliöjuuren, RMSE (yhtälöt 3 & 4) ja harhan (yhtälöt 5 & 6) avulla. Myös mallien residuaalikuvaajia analysoitiin ja lopuksi testattiin mallien normaalijakaumaoletusta Shapiro-Wilkinsin testillä.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$RMSE\% = 100 * \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad (4)$$

$$Harha = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (5)$$

$$Harha\% = 100 * \frac{Harha}{\bar{y}} \quad (6)$$

y_i = Puun pituuden/keskipituuden havaittu arvo

\hat{y}_i = Puun pituuden/keskipituuden estimoitu arvo

\bar{y} = Puun pituuden/keskipituuden havaintojen keskiarvo

n = Havaintojen lukumäärä

3 TULOKSET

3.1 Metsikkötason keskipituusmalli kuuselle

Kuusen keskipituuden malli on esitetty yhtälömuodossa lausekkeessa (7). Mallin parametrien estimaatit ja selittäjien p-arvot löytyvät taulukosta 9.

$$\ln(H_{\mu}) = \beta_0 + \beta_1 1/(T+10) + \beta_2 \text{Kasvupaikka} + \beta_3 \text{Maalaji} + \beta_4 \text{LeHdom/Hdom} + \beta_5 \text{Prec_sum} + e \quad (7)$$

Taulukko 9. Kuusen keskipituuden selittävien muuttujien estimaatit, keskivirheet ja p-arvot. Taulukossa myös mallin selitysaste (R^2), keskineliövirheen neliöjuuri ja harha.

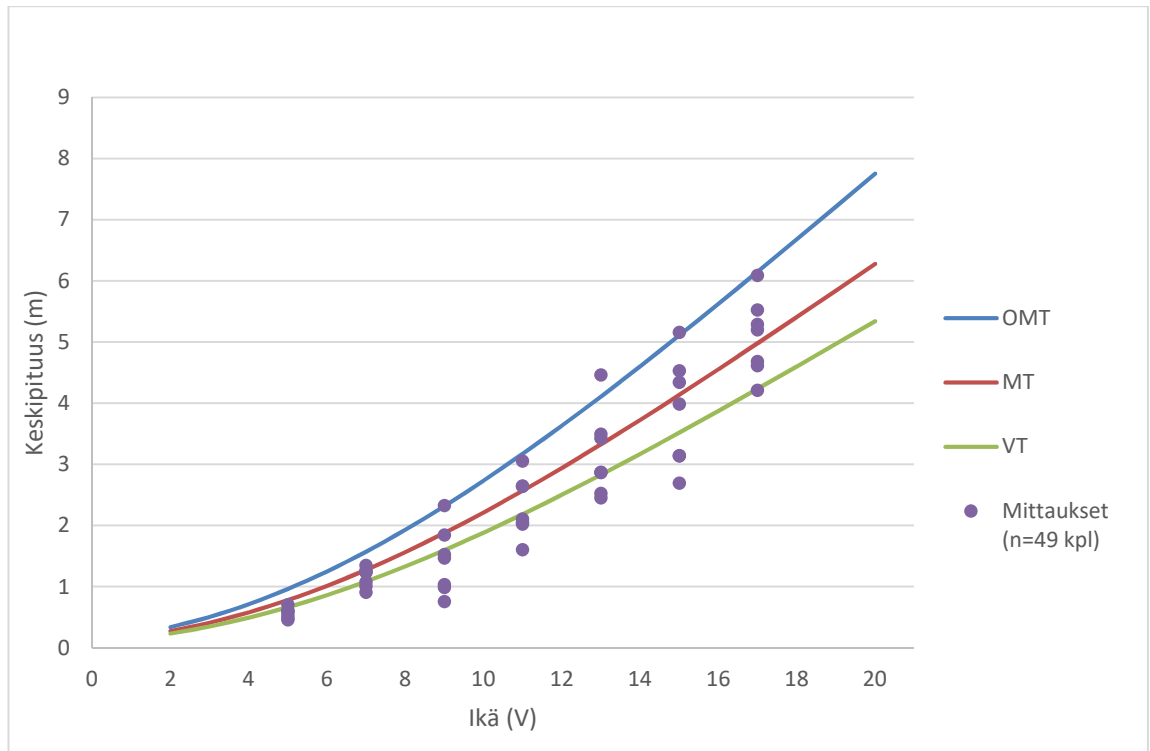
Parametri	Estimaatti	Keskivirhe	p-arvo
(Vakio)	1,529	,9293	,044
1/(T+10)	-62,490	5,1808	,000
Kasvupaikka=OMT	,373	,1351	,000
Kasvupaikka=MT	,161	,1214	
Kasvupaikka=VT	0 ^a		
Maalaji=Karkea	,324	,1123	,003
Maalaji=Keskikarkea	,187	,0860	
Maalaji=Hieno	,003	,0700	
Maalaji=Turve	0 ^a		
LeHdom / Hdom	-,152	,0670	,023
Prec_sum	,006	,0025	,018
R²	0,92793		
RMSE	0,42622 m		
RMSE%	16,968 %		
BIAS	0,00081 m		
BIAS%	0,03221 %		

Selitettävä muuttuja: H_{μ}

Malli: (Vakio), 1/(T+10), Kasvupaikka, Maalaji, LeHdom / Hdom, Prec_sum

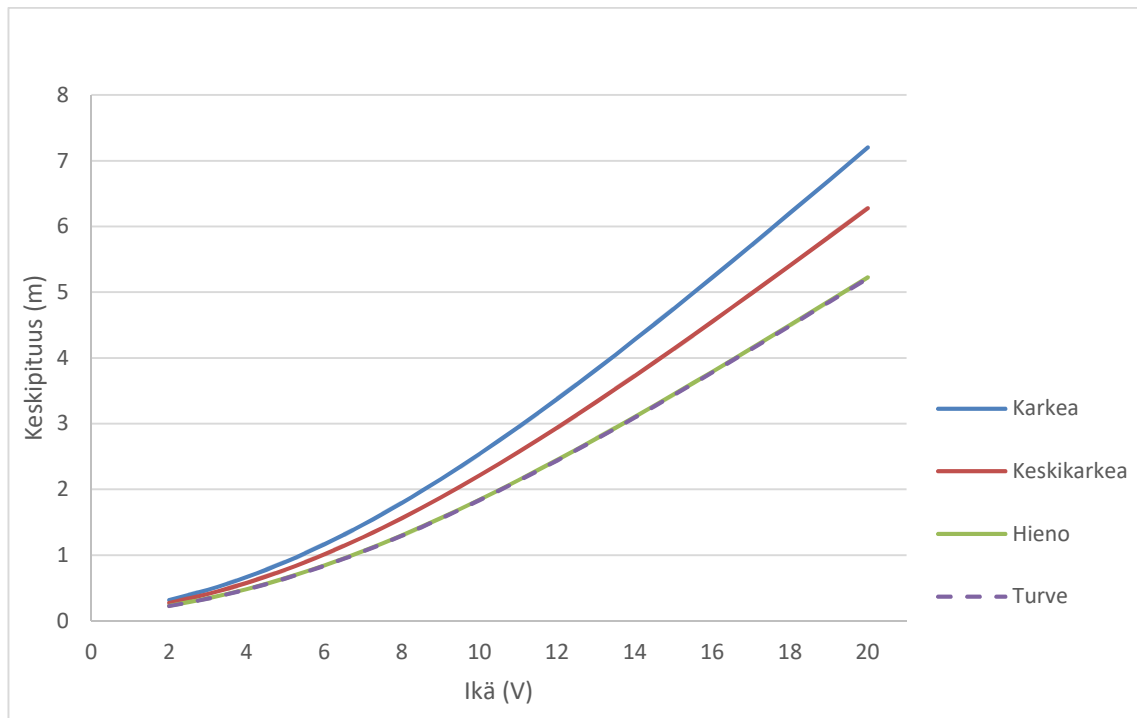
a. Luokittelumuuttujan vertailtava perustaso.

Kasvupaikka oli mallissa merkitsevä muuttuja. Kuusentaimien keskipituuden kehitys oli kasvupaikoilla OMT (+37,3 %) ja MT (+16,1 %) parempaa VT:n perustasoon verrattuna (kuva 17).



Kuva 17. Kuusen keskipituuden kehitys erilaisilla kasvupaikoilla. Maalajiksi on tässä oletettu keskikarkea maalaji. Lehtipuiden pituuskilpailua kuvaava muuttuja (LeHdom/Hdom) on arvolla 0,65, joka on vastaa aineiston keskiarvoa kohteilla, joilla taimikonhoito on tehty. Kasvukauden sadesumma (Prec_sum) on tässä aineiston keskiarvolla 364 mm.

Myös maalajilla oli huomattava vaikutus taimien pituuskehitykseen. Taimien keskipituuden kehitys oli parhainta karkeilla (+32,4 %) ja keskikarkeilla mailla (+18,7 %). Hienojakoisilla mailla taimien pituuskehitys oli hitaampaa (+0,3 %) ja käytännössä ei ollut eroa mallin turvemaiden perustasoon (kuva 18).

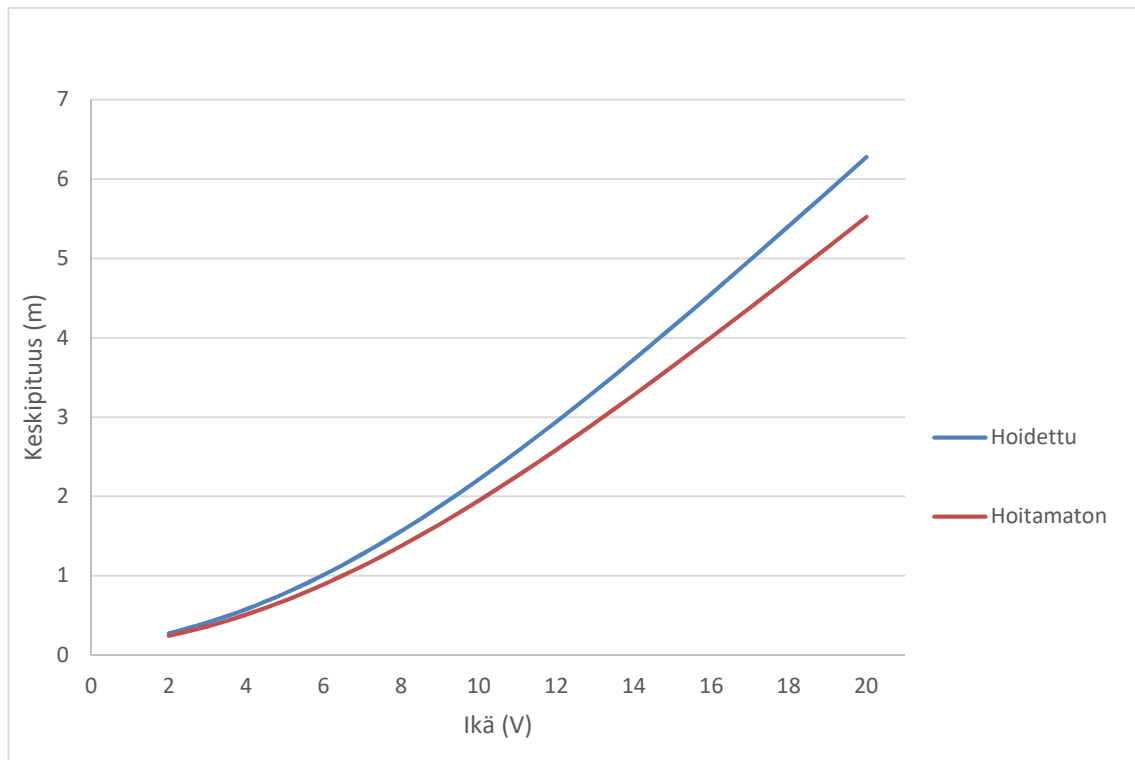


Kuva 18. Kuusen keskipituuden kehitys erilaisilla maalajeilla MT-tyypillä. Turvemaiden ja hienojakoisten kivennäismaiden ero on niin pieni, että nämä kaksi käyrää ovat käytännössä päällekkäin.

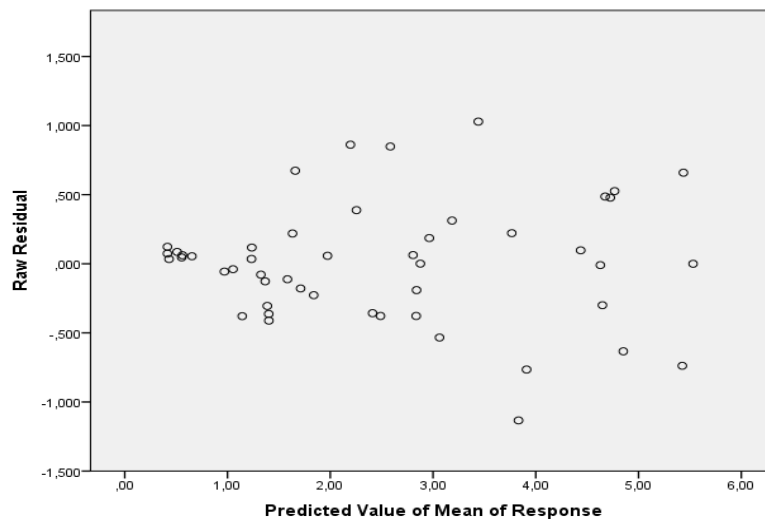
Lehtipuiden aiheuttama kilpailu hidasti kuusen taimien pituuskehitystä (- 15,2 %). Hoitamattomissa taimikoissa lehtipuiden pituuskilpailumuuttujan (LeHdom/Hdom) arvo oli keskimäärin 1,49 (vaihteluväli 0,81–2,68) ja hoidetuissa 0,65 (0-1,02) (kuva 19).

Kasvukauden aikana saatu sadesumma (mm) vaikutti kuusen taimien pituuskehitykseen positiivisesti (+0,6 %).

Kuusen keskipituuden RMSE on mallilla 0,43 m. Mallin suhteellinen RMSE% on 17,0 % ja selitysaste R^2 puolestaan 0,93 (taulukko 9). Keskipituuden harha oli 0,000809 ja harha% 0,03 %, joten malli oli lähes harhaton. Mallin residuaalikuvaajasta (kuva 20) huomataan että keskipituuden virhevaihtelu on heteroskedastista eli virhevaihtelu kasvoi ennustearvon (keskipituus) kasvaessa. Residuaalien vaihteluväli oli (-1,1–1,0 m).

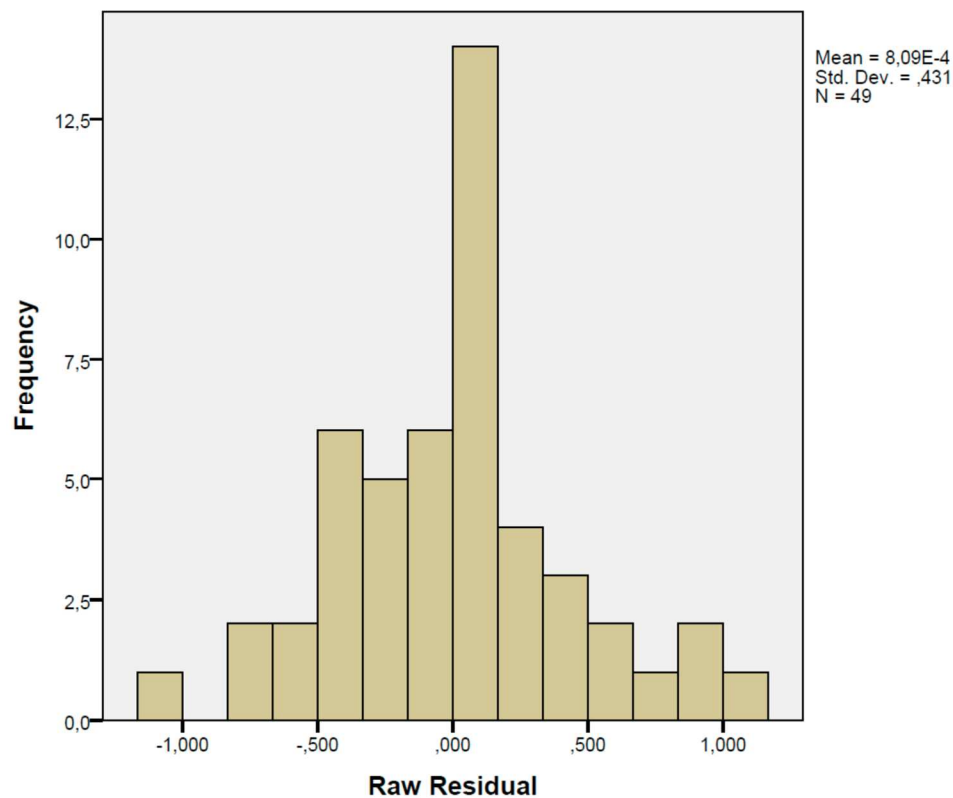


Kuva 19. Kuusen keskipituuden kehitys erilaisilla lehtipuiden pituuskilpailua (LeHdom/Hdom) kuvaavilla arvoilla. Hoidetussa taimikossa arvo oli 0,65 ja hoitamattomissa 1,49. Arvot ovat aineiston toteutuneet keskiarvot hoidetuilla ja hoitamattomilla kohteilla.



Kuva 20. Keskipituusmallin residuaalit (Raw Residual) keskipituuden ennusteen (Predidicted Value of Mean of Response) suhteen.

Jakaumaoletuksena mallissa käytettiin normaalijakaumaa, jota myös testattiin mallin residuaaleille tehtävällä Shapiro-Wilkinsin testillä. Testissä testattiin hypoteeseja: H_0 = Residuaalit ovat normaalisti jakautuneet ja H_1 = Residuaalit eivät ole normaalisti jakautuneita. Testin tuloksena saatiin, että p-arvo on suuri ($0,475 > 0,05$) eli H_0 jäisi voimaan. Tulos siis tukee residuaalien normaalijakautuneisuutta. Histogrammi residuaalien jakautumisesta löytyy kuvasta 21.



Kuva 21. Keskipituusmallin residuaalien histogrammi.

3.2 Puutason pituusmalli kuuselle

Lopullinen kuusen puutason pituusmalli sisälsi vain merkitseviä muuttujia, pois lukien kuitenkin mallin vakio, joka ei ollut merkitsevä (taulukko 10). Matemaattisesti malli on esitetty lausekkeessa (8). Mallin parametrien estimaatit löytyvät taulukosta 10.

$$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1/(T+10) + \beta_2 \text{ Kasvupaikka} + \beta_3 \text{ Soistuneisuus} + \beta_4 \text{ Halla} + \beta_5 \text{ Ist}_v = \text{Muok}_v + \beta_6 \text{ Elevation} + \beta_7 \text{ Ilmansuunta} + \beta_8 \text{ Topo_asema} + \beta_9 \text{ Mä}_r/1000 + \beta_{10} \text{ Le}_r/1000 + \beta_{11} \text{ LeHdom}/\text{Hdom} + \beta_{12} \text{ Prec_sum} + \beta_{13} \text{ LS} + e \quad (8)$$

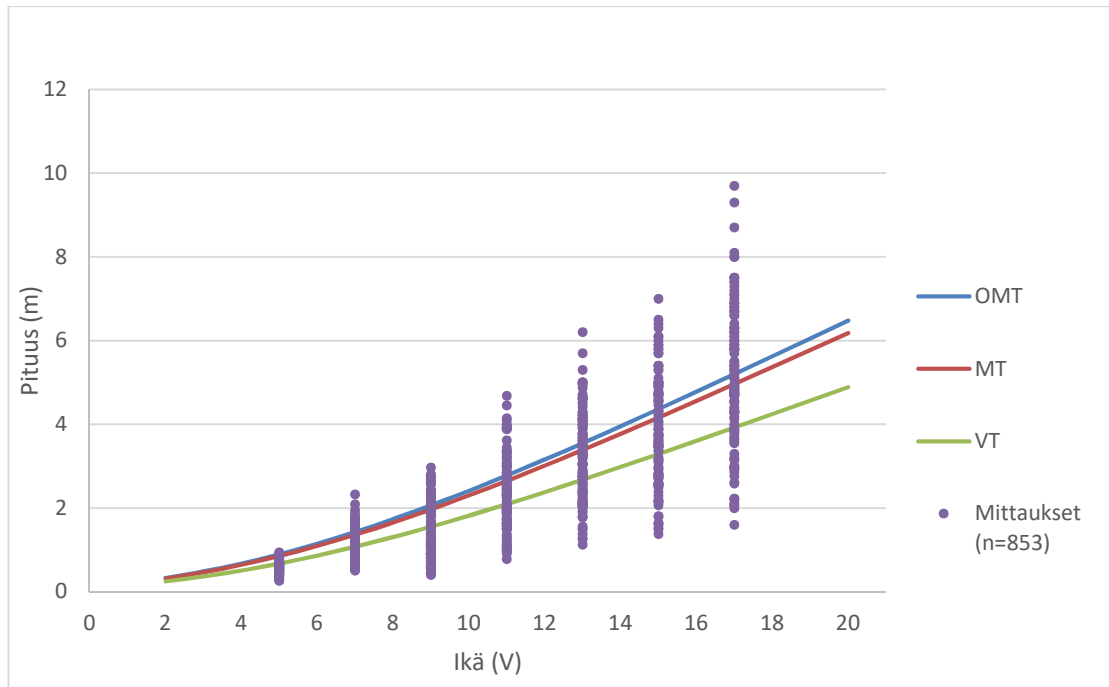
Taulukko 10. Kuusen pituuden selittävien muuttujien estimaatit, keskivirheet ja p-arvot. Taulukossa myös mallin selityssaste (R^2), keskineliövirheen neliöjuuri ja harha.

Parameter	B	Std. Error	p-arvo
(Intercept)	-1,199	,9875	,466
1/(T+10)	-59,197	2,4202	,000
Kasvupaikka=OMT	,281	,0495	,000
Kasvupaikka=MT	,235	,0472	
Kasvupaikka=VT	0 ^a		
[Soistuneisuus=0]	,265	,0430	,000
[Soistuneisuus=1]	0 ^a		
[Halla=0]	,274	,0441	,000
[Halla=1]	0 ^a		
[Ist_v = Muok_v=0]	,070	,0276	,011
[Ist_v = Muok_v=1]	0 ^a		
Elevation	-,0013	,0006	,039
Ilmansuunta=Pohjoinen	,116	,0440	,000
Ilmansuunta=Koillinen	,145	,0414	
Ilmansuunta=Itä	,138	,0417	
Ilmansuunta=Kaakko	,084	,0425	
Ilmansuunta=Etelä	,125	,0428	
Ilmansuunta=Lounas	,015	,0387	
Ilmansuunta=Länsi	-,030	,0416	
Ilmansuunta=Luode	0 ^a		
Topo_asema=Notko	-,114	,0484	,003
Topo_asema=Alarinne	-,152	,0444	
Topo_asema=Tasamaa	-,039	,0378	
Topo_asema=Keskirinne	-,017	,0389	
Topo_asema=Ylärinne	-,064	,0427	
Topo_asema=Mäen laki	0 ^a		
Mä_r/1000	-,050	,0189	,008
Le_r/1000	-,008	,0039	,033
LeHdom / Hdom	-,098	,0210	,000
Prec_sum	,005	,0015	,001
LS	,002	,0006	,001
R²	0,7926		
RMSE	0,8184 m		
RMSE%	32,155 %		
BIAS	0,0037 m		
BIAS%	0,1448 %		

Selitetty muuttuja: H
Malli: (Vakio), 1/(T+10), Kasvupaikka, Soistuneisuus, Halla, Ist_v = Muok_v, Elevation, Ilmansuunta, Topo_asema, Mä_r/1000, Le_r/1000, LeHdom / Hdom, Prec_sum, LS

a. Luokittelumuuttujan vertailtava perustaso.

Puutason pituusmallissa kasvupaikka oli merkitsevä muuttuja. Parhaita kuusentaimien pituuskehitys oli OMT-tyypillä (+28,1 %) ja toiseksi parhaita MT-tyypillä (+23,5 %), VT-tyypin ollessa verrattava perustaso.



Kuva 22. Kuusen pituuden kehitys erilaisilla kasvupaikoilla. Pituusmallin kuvaajia luodessa muuttujat on vakioitu seuraavasti: Soistuneisuus=0, Halla=0, (Ist_v=Muok_v)=1, Elevation =148 m, Ilmansuunta =Etelä, Topo_asema=Tasamaa, Mä_rl/1000=0,48, Le_rl/1000=2,23, LeHdom/Hdom=0,41, Prec_sum =364 mm ja LS =1328 °Cvirk.

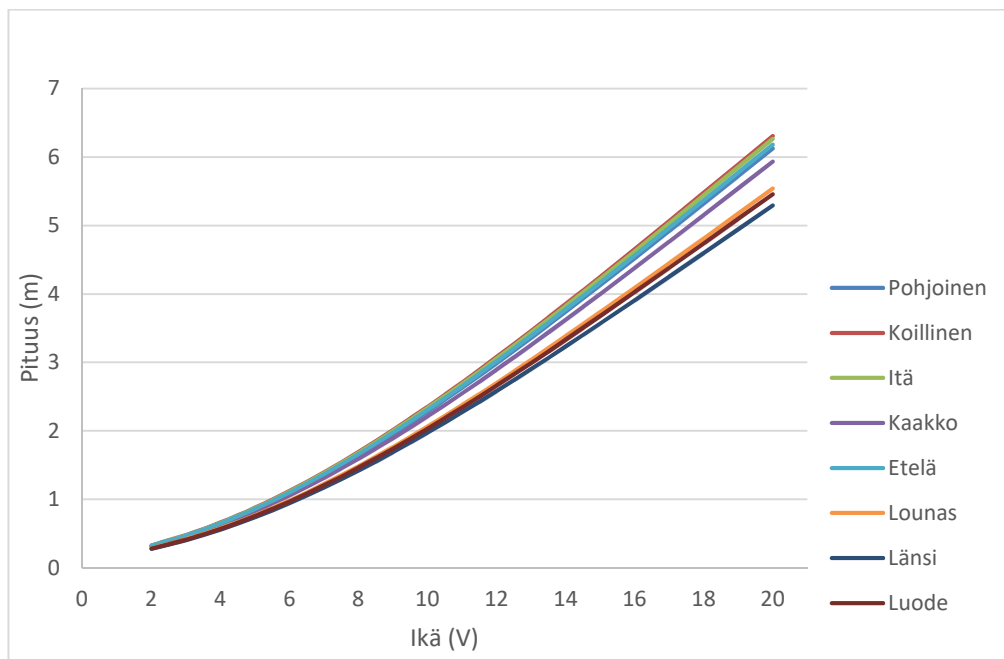
Kasvupaikan lisämääreistä soistuneisuus osoittautui myös merkitseväksi selittäjäksi. Puut, jotka eivät kärsineet soistuneisuudesta, omasivat paremman pituuskehityksen (+26,5 %).

Myös hallatuhojen esiintyvyys selitti kuusen pituuskehitystä. Pituuskehitys oli (+27,4 %) parempaa koealoilla, joilla ei esiintynyt hallavaurioita verrattuna mallin hallavaurioisiin koealoihin.

Istutuksen ja muokkauksen ajoitusta kuvaava muuttuja (Ist_v=Muok_v) oli mallissa merkitsevä selittäjänä. Sen vaikutus kuusen pituuskasvuun oli positiivinen (+7,0 %) kohteilla, jotka oli muokattu istutusta edeltävänä kasvukautena. Mallin vertailtavana perustasona olivat ne kohteet, jotka oli muokattu ja istutettu samalla kasvukaudella.

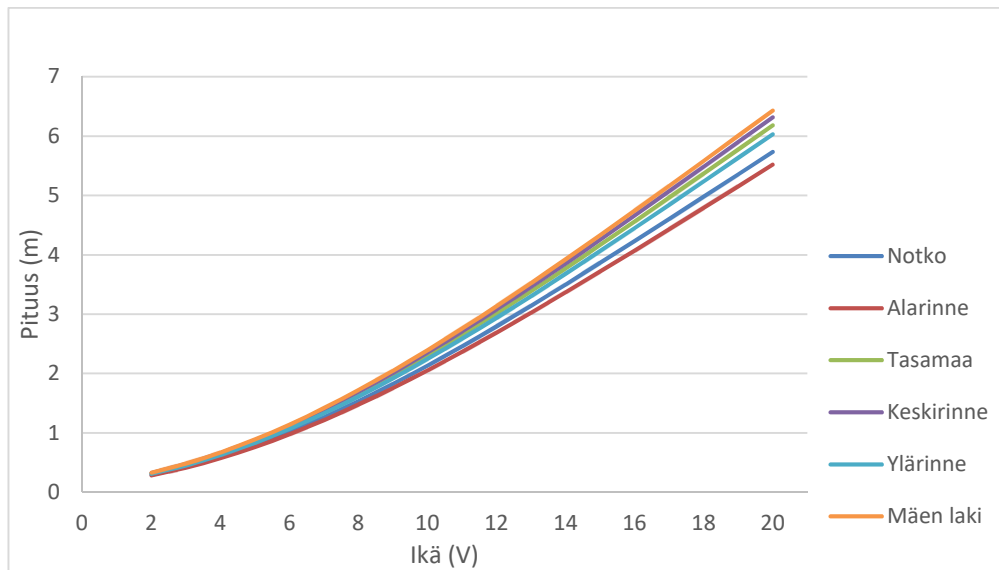
Maaston topografiaa kuvaavista selittäjistä, korkeus merenpinnasta (Elevation) vaikutti mallissa negatiivisesti kuusen pituuteen (-0,13 %).

Topografisista tekijöistä puiden pituuskehitykseen vaikutti myös rinteiden ilmansuunta (kuva 23). Parhaita puiden pituuskehitys oli koillis (+14,5 %), itä (+13,8 %), etelä (+12,5 %) ja pohjoinen (+11,6 %) -rinteillä. Heikointa pituuskehitys oli puolestaan länsi (-3,0 %), lounas (+1,5 %) ja luode (vertailutaso) -rinteillä.



Kuva 23. Rinteiden ilmansuunnan vaikutus kuusen pituuden kehitykseen.

Maaston topografinen asema osoittautui myös mallissa merkitseväksi selittäjäksi (kuva 24). Huonointa pituuskehitys oli alavissa maastonkohdissa kuten notko (-11,4 %) ja alarinne (-15,2 %). Parhaita pituuskehitys oli puolestaan ympäristöään korkeammilla maaston kohdilla kuten mäen laki, joka oli vertailtava perustaso. Ylärinteellä (-6,4 %), keskrinteellä (-1,7 %) ja tasamaalla (-3,9 %) pituuskehitys oli hieman heikompaa kuin mäen laella.



Kuva 24. Maaston topografisen aseman vaikutus kuusen pituuden kehitykseen.

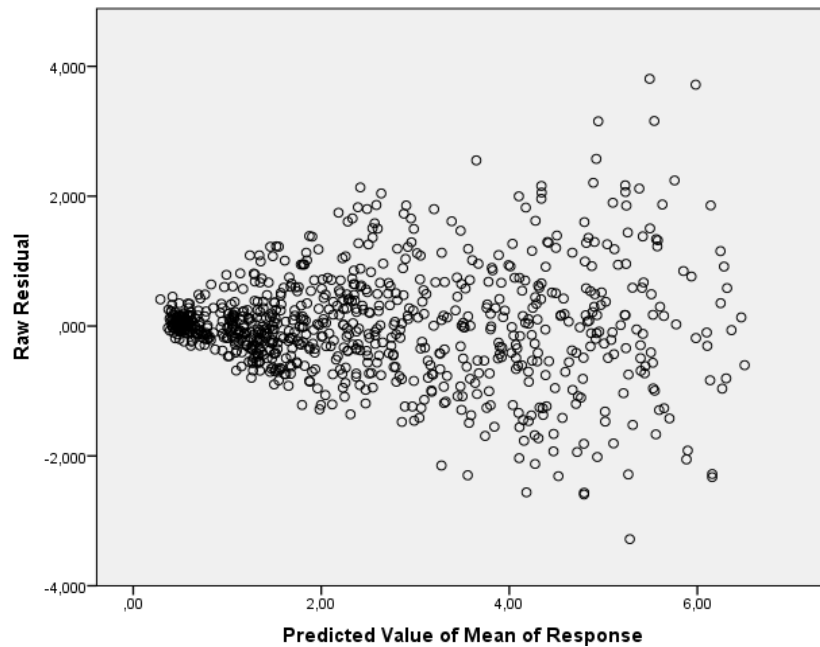
Luontaisesti uudistuneiden puiden kilpailua kuvaavat muuttujat, $M\ddot{a}_{rl}/1000$ (-5,0 %), $Le_{rl}/1000$ (-0,8 %) ja $LeHdom/Hdom$ (-9,8 %), hidastivat kaikki kuusen pituuskehitystä.

Ilmasto-olosuhteita kuvaavat muuttujat vaikuttivat kuusen pituuskehitykseen positiivisesti. Kasvukauden aikana saatu sadesumma ($Prec_{sum}$) paransi puiden pituuskehitystä keskimäärin (+0,5 %) ja samoin tehoisa lämpösumma (LS) (+0,2 %).

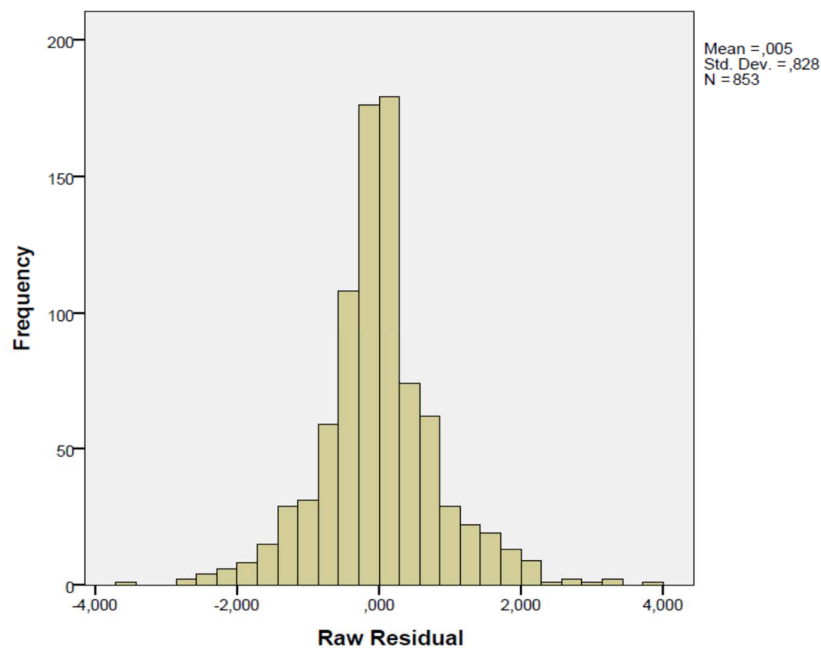
Puutason mallissa RMSE oli 0,82 m ja mallin suhteellinen RMSE% oli 32,2 % (taulukko 10). Pituuden harha 0,0037m ja harha% 0,14% olivat hyvin pienet. Mallin selitysaste R^2 puolestaan 0,79. Mallin residuaalikuvaajasta (kuva 25) huomataan että myös yksittäisen puun pituuden virhevaihtelu on voimakkaan heteroskedastista eli virhevaihtelu kasvoi ennustearvon (pituus) kasvaessa kuten keskipituudellakin. Residuaalien vaihteluväli oli (-3,3–3,8 m).

Jakaumaoletus puutason pituusmallissa oli normaalijakauma, vaikka Shapiro-Wilkinsin testi ei osoittanutkaan, että residuaalit olisivat normaalisti jakautuneita (p-arvo $0,00 < 0,05$). Jakaumaoletuksena mallissa testattiin siksi myös vaihtoehtoisia gamma- ja käänteistä normaalijakaumaa, joissa mallin varianssi sai kasvaa samalla kun odotusarvo (kuusen pituus) kasvoi. Shapiro-Wilkinsin testi ei kuitenkaan osoittanut näilläkään, että normalisoidut residuaalit olisivat normaalisti jakautuneita ja tämän takia päädyttiin käyttämään yksinkertaisempaa normaalijakaumaa. Gamma- ja käänteisen

normaalijakauman malleissa (RMSE) puun pituudelle oli lisäksi huonompi, mikä puolsi normaalijakauman käyttöä. Histogrammi puutason mallin residuaalien jakautumisesta löytyy kuvasta 26.



Kuva 25. Pituusmallin residuaalit (Raw Residual) pituuden ennusteen (Predidicted Value of Mean of Response) suhteen.



Kuva 26. Kuusen pituusmallin residuaalien histogrammi.

4 TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Metsikkötason keskipituusmallin tarkastelu

Kasvupaikkojen väliset erot mallissa olivat oletetusti merkitseviä. Parhaita pituuskehitys oli OMT-metsätyypillä ja heikointa VT-tyypillä (kuva 17). Tosin metsikkötason aineisto sisälsi vain 3kpl VT-tyypin kasvupaikkoja, joten malli lienee tarkempi OMT- ja MT-tyypeillä. Kasvupaikan lisämääreitä kuvaavat soistuneisuus sekä kivisyys eivät osoittautuneet metsikkötason mallissa merkitseviksi.

Maalajin vaikutus taimien keskipituuden kehitykseen oli merkitsevä. Pituuskehitys oli sitä parempaa, mitä karkeampaa oli kasvupaikan maalaji (kuva 18). Tämä tulos vahvistaa käsitystä, että kääntömätästys muokkausmenetelmänä soveltuisi erityisesti keskikarkeille kivennäismaille, joilla vesitalous on kunnossa (Luoranen ym. 2012, Heiskanen ym. 2013, Äijälä 2014). Hienojakoisilla kivennäismailla sekä turvemailla pituuskehitys oli heikompaa. Kuusen heikkoon pituuskehitykseen hienojakoisilla- sekä turvemailla on saattanut vaikuttaa myös soistuneisuus sekä hallavauriot, jotka varsinkin turvemailla olivat paikoin yleisiä. Hallavauriot ei kuitenkaan keskipituudenmallissa ollut merkitsevä muuttuja.

Karkeiden maiden osalta pituusmalli saattaa kuitenkin yliarvioida pituuskehityksen hyvyttä, sillä karkeaksi maalajiksi luokiteltuja kuvioita oli tässä tutkimuksessa vain yksi kappale. Kyseisen kuvion kasvupaikka oli myös maalajin karkeuteen nähden poikkeuksellisen hyvä, ollen OMT-tyyppiä.

Puuston kilpailua kuvaavista muuttujista, lehtipuiden pituuskilpailu (LeHdom/Hdom), osoittautui ainoaksi merkitseväksi kuusien pituuskehitystä rajoittavaksi tekijäksi. Kilpailevan lehtipuuston sekä männyn runkoluvut eivät olleet mallissa merkitseviä. Siipilehdolla ym. (2015) oli tutkimuksessaan myös hyvin samankaltainen tulos. Kuten tässäkin työssä myös heillä vesakon pituuskilpailua kuvaava muuttuja (HdomVesa/Hdom) osoittautui erittäin merkitseväksi pituuskehitystä rajoittavaksi tekijäksi ja toisaalta vesojen määrä ei selittänyt pituuskehitystä. Aiemmin Kanadassa lehtipuiden pituuskilpailun (lehtipuun pituus suhteessa kasvatettavan havupuun pituuteen) on osoitettu olleen myös merkitsevä havupuiden tilavuuskehitystä heikentävä tekijä (Cortini ja Comeau 2008). Taimikonhoitoa kuvaava dummy-muuttuja ei ollut tässä työssä merkitsevä, toisin kuin Siipilehdon ym. (2015) tutkimuksessa. Taimikonhoidon

vaikutusta puuston pituuteen kuitenkin tarkasteltiin epäsuorasti lehtipuiden pituuskilpailumuuttujan ($\text{LeHdom}/\text{Hdom}$) välityksellä (kuva 19).

Ilmasto kuvaavista muuttujista parhaiten kuusen keskipituuskehitystä selitti kasvukauden sadesumma (Prec_sum). Myös Saksan ym. (2005) tutkimuksessa kasvukauden aikainen sadesumma vaikutti positiivisesti kuusen pituuskasvuun. Sademäärän on aiemmin osoitettu korreloivan myös kuusen läpimitan kasvun kanssa (Petráš ja Mecko 2011).

Poikkeuksellisesti lämpösumma ei tässä työssä selittänyt merkitsevästi pituuskehitystä. Aiemmissa malleissa lämpösumma on kuitenkin korreloinut hyvin kuusen pituuskehityksen kanssa ja sitä on käytetty malleissa (Ojansuu 1996, Siipilehto 2006, Siipilehto ym. 2015). Tämän tutkimuksen lämpösumma kuitenkin eroaa edellä mainituista, sillä tässä käytettiin taimien istutuksen jälkeen toteutuneiden lämpösummien keskiarvoja eikä maantieteellisiä lämpösummia. Tämän työn tutkimusalue sijaitsi myös suhteellisen suppealla alueella, joten voi olla, että lämpösummat ja niiden väliset erot eivät siten päässeet tässä työssä vaikuttamaan merkitsevästi keskipituuskehitykseen.

4.2 Metsikkötason keskipituusmallin vertailu

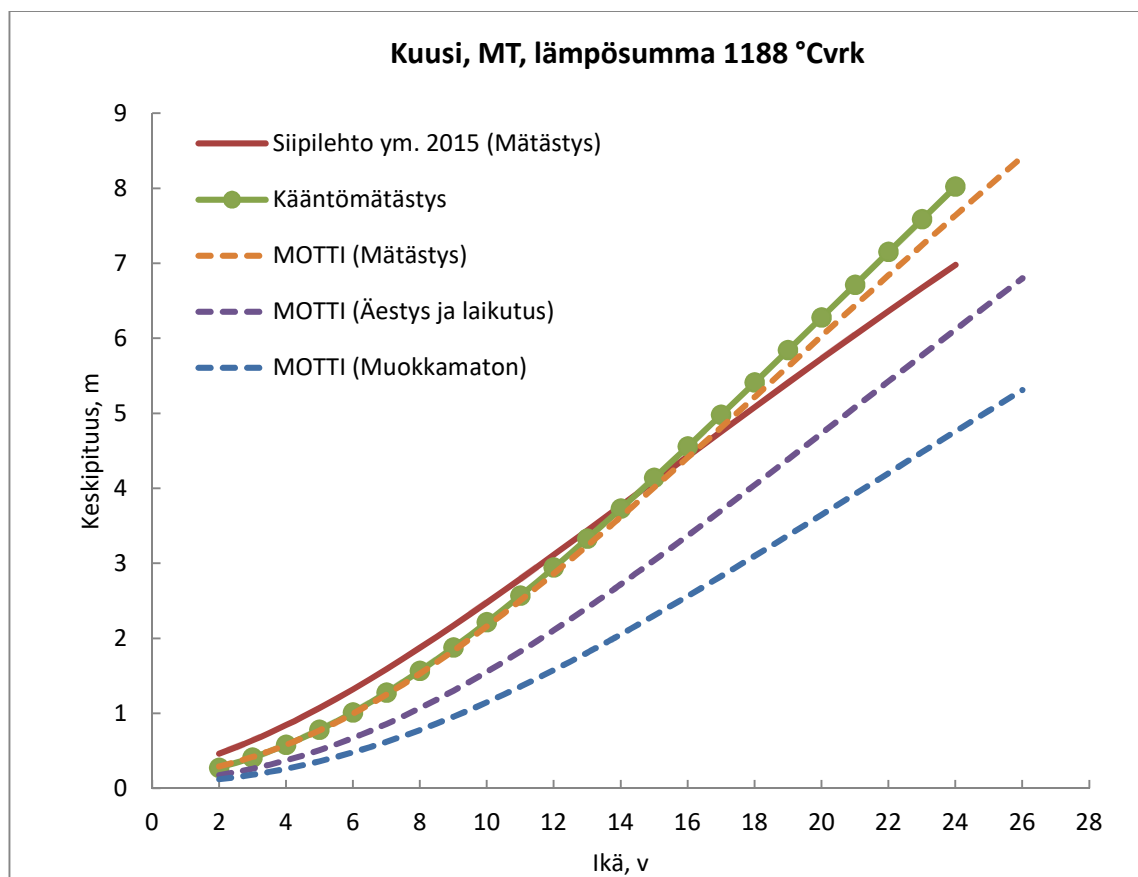
Keskipituusmallia kääntömätästetyillä kohteilla vertailtiin Siipilehdon ym. (2015) OLS-malliin (*Ordinary Least Squares* eli pienimmän neliösumman malli) sekä MOTTI-ohjelmiston kuusen keskipituusmalleihin, joissa käytetty maanmuokkaus samalla vaihteli.

MOTTI-ohjelmistossa kuusen keskipituuskehitys kuvataan eri maanmuokkaustavoilla siten, että muokkaamattomassa kohteessa käytetään keskipituutta, $\ln(H)$, äestetyllä/laikutetulla kohteella pohja-pinta alalla painotusta, $\ln(hgM)$ ja mätästyksessä puolestaan valtapituuskehitystä, $\ln(H_{\text{dom}})$ (Siipilehto 2016). Nykyisiä Motin malleja kuuselle ei ole julkaistu, mutta niiden muoto ja rakenne muistuttavat vastaavia männylle julkaistuja malleja (Siipilehto 2011). Kaikki vertailtavat mallit saatiin käyttöön Luonnonvarakeskuksen vanhemmalta tutkijalta Jouni Siipilehdolta.

Tarkastelussa vertailumalleilla käytettiin lämpösummaa arvolla $1188\text{ }^{\circ}\text{C}_{\text{vrk}}$, joka oli tämän tutkimuksen kääntömätästyskuvioiden maantieteellisten lämpösummien keskiarvo. Tarkastelussa myös kasvupaikka rajattiin koskemaan MT-tyyppejä, johon

kuului valtaosa sekä tämän tutkimuksen, että vertailumallien aineistoista. Lisäksi Siipilehdon ym. (2015) -mallissa vertailun lähtökohtana käytettiin hoidettua taimikkoa. Kääntömätästyskohteiden keskipituusmallin muuttujat vakioitiin vertailuun samoin kuin aiemmin kuvassa 17.

Vertailun (kuva 27) perusteella kuusentaimien pituuskehitys kääntömätästetyillä kohteilla vastaa lähes täydellisesti vastaavaa Motin mallia mätästetyille kohteille. Ero 5-vuotiailla taimilla on kääntömätästetyn ja Motin mätästetyn mallin välillä vain noin 2 cm kääntömätästetyksen hyväksi. 24-vuotiaalla puillakin eroa on ainoastaan vain noin 40 cm.



Kuva 27. Vertailtavat keskipituusmallit.

Siipilehdon ym. (2015) malliin verrattaessa kääntömätästetyillä kohteilla taimien pituuskehitys on aluksi hieman heikompaa. Ero viisi vuotiailla taimilla on kuitenkin vain noin 30 cm. Kääntömätästettyjen kohteiden taimet ohittavat kuitenkin lopulta Siipilehdon ym. (2015) taimien pituuden noin 15-vuotiaina. Taimet ovat tällöin vähän yli 4 m pituudeltaan.

Motin mallin muokkaamattomiin sekä pintamuokkauksen (äestys/laikutus) omaaviin kohteisiin verrattuna ero pituuskehityksessä on selvästi mätästysmenetelmien hyväksi. Muokkaamattomat sekä pintamuokatut kohteet jäävät alusta alkaen jälkeen pituuskehityksessä ja tämä ero vain voimistuu taimikon varttuessa. Muokkaamattomilla kohteilla 15-vuotiaat taimet ovat noin 1,8 m lyhyempiä kuin vastaavat taimet kääntömätästetyillä kohteilla. Äestettyjen ja laikutettujen kohteidenkin taimet ovat tuolloin jo noin 1,1 m jäljessä kääntömätästettyjen taimien pituuskehityksestä.

Malleja vertailtaessa ja arvioitaessa kannattaa muistaa myös näiden alkuperäinen mallinnusaineisto. Tämän työn aineisto kääntömätästetyiltä kohteilta käsitti ikäluokat 5-17 vuotta. Siten alle 5-vuoden sekä yli 17-vuoden ikäisissä taimikoissa keskipituusmallia on sovellettu aineistonsa ulkopuolelle. Siipilehdon ym. (2015) aineisto käsitti puolestaan 19 kuusentaimikkoa, joiden ikä vaihteli 11–24 vuoden välillä. Motin malleissa (Siipilehto 2006) kuusen aineisto (TINKA- ja INKA-koealat) käsitti 227 kuviokoealaa, joiden ikä vaihteli 13–168 vuoden välillä. Samaa aineistoa on mitä luultavammin käytetty myös tässä vertailussa esiintyvissä Motin uudemmissa keskipituuden malleissa. Kun mallinnusaineistot huomioidaan niin saattaa olla, että nuorilla alle 11-vuotiailla taimilla, pituuskehityksen ennuste on siten luotettavampi tämän työn keskipituusmallilla (kääntömätästys) kuin käytetyillä vertailumalleilla.

4.3 Puutason pituusmallin tarkastelu

Varsinkin puutasolla tarvittiin logaritmimuunnosta lineaarisessa mallissa virhevaihtelun homogenisoimiseksi. Puun pituuden virhevaihtelu, kun oli selvän heteroskedastista eli virhevaihtelu kasvoi vasteen arvon kasvaessa (kuva 25).

Kasvupaikkojen väliset erot olivat puutason mallissa myös merkitseviä toisin kuin esim. Siipilehdolla ym. (2015). Ero merkitsevyydessä saattaa johtua siitä, että tässä tutkimuksessa kasvupaikka määritettiin myös jokaiselta koealalta erikseen, jolloin kasvupaikkojen väliset erot pääsivät paremmin esiin myös puutason mallissa. Erot varsinkin OMT- ja MT-tyypin välillä kuitenkin pienenevät puutason mallissa (kuva 22) verrattuna keskipituuden malliin.

Kasvupaikan lisämääreistä merkitseväksi nousi soistuneisuus, joka heikensi puiden pituuden kehitystä. Kivisyys ei osoittautunut puutason mallissakaan merkitseväksi.

Tulosta saattaa selittää osaltaan se, että kivisyys oli vaikeammin maastossa inventoitavissa kuin soistuneisuus. Soistuneisuuden havaitsee helposti esim. rahkasammalten esiintyvyydestä.

Hallan vaikutus taimien pituuskehitykseen oli voimakas ja se heikensi taimien pituuskehitystä, jopa 24,6 %. Kuusen tiedetään olevan herkkä sienitaudeille sekä hallalle, ja pahoja hallavuosia onkin ollut tällä vuosituhannella tiheään (Remes 2016). Tässä tutkimuksessa hallatuhoja havaittiin erityisesti turvemaiden sekä muiden alavienmaiden koealoilla, joihin kylmä ilma tyypillisesti kerääntyy.

Taimikonhoito ei osoittautunut merkitseväksi puutason pituusmallissakaan. Sen sijaan maanmuokkauksen suhdetta istutukseen kuvaava muuttuja ($ist_v=muok_v$) oli mallissa merkitsevä. Taimien pituuskehitys oli hieman parempaa (+7 %) niillä kääntömätästetyillä kohteilla, jotka oli muokattu istutusta edeltävänä vuotena. Tämän havainnon perusteella voisi olettaa, että kääntömättään ominaisuudet paranevat vielä ensimmäisen talven jälkeen esim. mättään tiivistymisen ja madaltumisen ansiosta siten, että se näkyy taimien parantuneena pituuskehityksenä.

Ilmasto-olosuhteita kuvaavista muuttujista sekä sadesumma ($Prec_sum$) että toteutunut lämpösumma (LS) selittivät positiivisesti kuusen pituuskehitystä. Sadesumma oli myös metsikkötason keskipituusmallissa merkitsevä, mikä korostaa kasvukauden aikaisen sateen merkitystä taimien pituuskehityksen kannalta.

Puiden välistä kilpailua kuvaavista muuttujista lehtipuiden pituuskilpailu ($LeHdom/Hdom$) oli merkitsevä kuten metsikkötason keskipituusmallissa. Myös männyn ja lehtipuiden lukumäärä hidasti puun pituuskehitystä toisin kuin Siipilehdolla ym. (2015), jossa vesojen lukumäärä ei selittänyt pituutta. Erikoista oli, että mäntyjen lukumäärä koealalla hidasti pituuskehitystä enemmän kuin lehtipuiden lukumäärä. Tämä saattaa johtua osittain myös männyn heikompaa kasvupaikkaa indikoivasta vaikutuksesta.

Puutason tarkastelussa erityinen mielenkiinto kohdistui Maanmittauslaitoksen korkeusmalliin ja siitä johdettuihin muuttujiin (Elevation, Kaltevuus, Ilmansuunta, Topo_asema, TWI). Maastonkorkeus (Elevation) vaikutti mallissa negatiivisesti puun pituuteen. Tulos vaikuttaa loogiselta, sillä myös Miinan (2001) mukaan, mitä

pohjoisempaan ja korkeammalla merenpinnasta kasvupaikka sijaitsee, sitä huonompaa on myös kasvu.

Korkeusmallista johdetut rinteiden ilmansuunta sekä topografista-asemaa kuvaava (Topo_asema) olivat myös merkitseviä pituutta selittäviä tekijöitä. Ilmansuunta vaikutti siten, että puiden pituuskehitys oli parempaa pohjois-, koillis-, itä-, kaakko- sekä etelärinteillä ja heikompaa puolestaan länsi-, lounas- ja luoteisrinteillä (kuva 23). Ilmansuunnan vaikutus taimien pituuskehityksessä liittyy todennäköisesti valoisuus-varjostus olosuhteisiin sekä niistä johtuviin lämpötilan vaihteluihin uudistusalueella. Tulosten valossa vaikuttaisikin siltä, että erityisesti lounas- länsi- ja luode rinteet, jotka ovat alttiita iltapäivän paahtavalle auringolle, olisivat myös heikompia kasvupaikkoja kehittyville kuusen taimille. Länsipuolen rinteillä taimien vesitalous voi joutua tällöin kovalle koetukselle voimakkaan haihdunnan takia. Pohjois- ja itärinteillä taimet pääsisivät siten vähemmällä kuivuusstressillä, koska ne ovat paremmin paahteelta suojassa. Varjostuksen on myös aiemmin havaittu selittävän kuusen taimien kehitystä ja kasvua. Tutkimuksessaan Heiskanen (2002) havaitsi, että istutuksen jälkeinen varjostus (keinotekoinen varjostussuoja asetettuna taimen eteläpuolelle) paransi version pituuskasvua sekä vähensi samalla taimivaurio riskiä.

Topografinen asema (Topo_asema) jaettiin 6 luokkaan (Notko, alarinne, tasamaa, keskirinne, ylärinne ja mäen laki) (Jenness Enterprises 2016). Luokittelu eroaa hieman esim. VMI:ssä käytetystä topografia luokituksesta (VMI 11 Maastotyöohje 2009), eikä ole siten sen kanssa täysin vertailukelpoinen. Topografinen asema oli kuitenkin merkitsevä ja tulosten mukaan pituuskehitys oli sitä parempaa mitä korkeammassa topografisessa asemassa puu sijaitsi (kuva 24). Täten mäen laet ja ylärinteet olivat hyviä kasvupaikkoja, kun taas notkot ja alarinteet huonompia. Tulos on hieman ristiriitainen yleisen käsityksen kanssa siitä, että kuusi olisi alavien ja kosteampien maiden puulaji. Tulosta voi osaltaan selittää tutkimuksen inventointitapa, koska taimien pituudet mitattiin vain elävistä ja terveistä taimista. Lisäksi kuvioiden karuimpia mäkien lakia oli harvoin muokattu/istutettu, jolloin havaintoaineistoon ei näitä huonoimpia paikkoja tullut. Voi siis olla, että tulos siten yliarvioi mäen laen kasvuhuvelyä. Myös hallalla sekä soistuneisuudella on luultavasti osuutta alavien maiden heikossa pituuskehityksessä.

Verrattaessa havaintoja topografian vaikutuksesta aiempiin tutkimuksiin niin mm. Mäkitalo ja Heiskanen (2001) havaitsivat männillä (*Pinus sylvestris* L.), että

topografialuokka (VMI: n mukainen luokitus) sekä maaston kaltevuus selittivät taimien kuolleisuutta. Taimien kuolleisuus oli sitä suurempi mitä pienempi oli maaston kaltevuus. Syyksi tälle he epäilivät sekä vesipitoisuuden että kylmän ilman kerääntymistä notkelmiin, joka heikensi taimia ja edisti mahdollisesti myös versosurmatuhoja. Toisaalta topografiamuuttajat eivät olleet merkitseviä heidän keskipituuden mallissa ja lisäksi tutkimus oli tehty Lapissa, jossa ilmasto-olosuhteet ovat erilaiset, mitä tässä tutkimuksessa.

Korkeusmallista johdetut rinteiden kaltevuus sekä TWI eivät osoittautuneet merkitseviksi puutason mallissa.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa luotiin mallit kuusentaimien keskipituuskehitykselle sekä puutason pituuskehitykselle kääntömätästetyillä kohteilla. Molemmissa luoduissa malleissa taimien iän lisäksi merkitsevinä selittäjinä olivat kasvupaikkatyyppi, lehtipuiden pituuskilpailu (LeHdom/Hdom) sekä kasvukauden aikainen sadesumma.

Metsikkötason keskipituusmallissa havaittiin, että karkeammilla maalajeilla pituuskehitys oli parempaa kuin hienojakoisilla ja turvemilla. Tämä tukee yleistä käsitystä siitä, että kääntömätästysmenetelmä sopisi erityisen hyvin keskimäärin karkeammille maalajeille.

Puutasonmallissa mukana olivat lisäksi Maanmittauslaitoksen korkeusmalli ja siitä johdetut topografiset muuttajat. Maaston topografia vaikuttikin kuusen pituuskehitykseen ja havaittiin, että iltapäivän auringolle alttiit lounaan-, lännen- ja luoteenrinteet olivat keskimäärin heikompia kasvupaikkoja kuuselle. Samoin maaston alavat kohdat kuten notkot ja alarinteet olivat tässä mallissa heikompia pituuskehitykseltään kuin korkeammassa topografisessa asemassa sijaitsevat taimet. Tämä eroaa yleisestä käsityksestä kuusesta alavien maiden puulajina.

Pituuskehitys vaikutti molemmissa malleissa loogiselta ja kuusen metsikkötason keskipituuskehitystä vertailtiin myös muihin olemassa oleviin kuusen keskipituusmalleihin. Kääntömätästetyillä kohteilla keskipituuskehityksen havaittiin

olevan selvästi parempaa kuin Motti-ohjelman simuloinneissa muokkaamattomilla tai pintamuokatuilla (äestys/laikutus) kohteilla. Mielenkiintoinen havainto oli myös se, että kääntömätästettyjen kohteiden keskipituuskehitys vastasi lähes täydellisesti nykyistä Motti-ohjelman mätästettyjen kohteiden mallia. Vertailun havainnot vahvistavat käsitystä mätästetyksen eduista kuusen maanmuokkausmenetelmänä.

Erityisesti puutason pituusmallissa käytettiin myös paikkatietoaineistoja (Maanmittauslaitos ja Ilmatieteen laitos) selittämään kuusen pituuskehitystä. Tutkimuksessa osoitettiin, että näitä digitaalisia paikkatietoaineistoja pystytään hyvin hyödyntämään kuusen pituuskehityksen mallinnuksessa. Digitaalisten paikkatietoaineistojen käytön puolesta puhuu myös niiden tasalaatuisuus, kattavuus sekä nykyinen helppo saatavuus. Digitaalinen tieto tulee tulevaisuudessa lisääntymään vielä entisestään ja samalla niiden hyödyntämismahdollisuudet myös puuston kehityksen mallinnuksessa kasvavat.

KIRJALLISUUS

- Adams, H. R., H. R. Barnard, and A. K. Loomis. 2014. Topography alters tree growth – climate relationships in a semi-arid forested catchment. *Ecosphere* 5(11): 148.
- Byun, J. G., Lee, W. K., Kim, M., Kwak, D. A., Kwak, H., Park, T., et al. 2013. Radial growth response of *Pinus densiflora* and *quercus* spp. to topographic and climatic factors in South Korea. *Journal of Plant Ecology*, 6(5): 380–392.
- Cajander, A. K. 1949. Forest types and their significance. Suomen metsätieteellinen seura, Helsinki. 71 s.
- Cortini, F. & Comeau, P. G. 2008. Effects of red alder and paper birch competition on juvenile growth of three conifer species in southwestern British Columbia. *Forest Ecology and Management*. 256: 1795-1803.
- Dilts, T. 2016. Topography Tools for ArcGIS 10.3 and earlier. ArcGIS-ohjelmiston työkalupaketti. Saatavissa: <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=b13b3b40fa3c43d4a23a1a09c5fe96b9>. [Viitattu: 15.5.2016]
- Grossnickle, S. C. 2000. Ecophysiology of northern spruce species: the performance of planted seedlings. NRC-CNRC, Ottawa. 407 s s.
- Hallsby, G. & Örlander, G. 2004. A comparison of mounding and inverting to establish norway spruce on podzolic soils in sweden. *Forestry* 77(2): 107-117.
- Heiskanen, J. 1989. Kangasmaiden vesitalous – Kirjallisuustarkastelu. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 339. 53 s.
- Heiskanen, J. 2002. Effects of pre- and post-planting shading on growth of container Norway spruce seedlings. *New Forests* 27: 101-114.
- Heiskanen, J. 2003. Kuusen paakkutaimien uudistumisen perusteet – Kirjallisuuteen pohjautuva katsaus. Tutkimushankkeen esiselvitys. Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoen tutkimusasema. Moniste. 25 s. Saatavissa: <http://www.metla.fi/pp/JHei/Katsaus2003.pdf>. [Viitattu: 15.11.2015]
- Heiskanen, J & Rantala, J. 2001. Metsänuudistamisen maanmuokausmenetelmiä tutkitaan. *Metsäntutkimuslaitos taimiuutiset* 2/2001: 7-9
- Heiskanen, J. & Viiri, H. 2001. Mätästys lisää kuusentaimien kasvua ja vähentää tukkimiehentäin tuhoja. *Metsäntutkimuslaitos taimiuutiset* 3/2001: 4-6
- Heiskanen, H., Saksa, T & Luoranen, J. 2013. Soil preparation method affects outplanting success of Norway spruce container seedlings on till soils susceptible to frost heave. *Silva Fennica* 47 (1). 17 s.
- Isotalo, J. 2016. Lineaaristen mallien perusteet. Luentomateriaali Helsingin yliopiston Tilastollisia malleja (Y131)- kurssilta tammikuussa 2016.

Jenness Enterprises. 2016. Topographic Position and Landforms Analysis
Andrew D. Weiss, The Nature Conservancy. Saatavissa:
http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf. [Viitattu: 15.5.2016]

Laiho, O. 1985. Maanmuokkaus kivennäismaiden ongelma-alueilla.
Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 184: 16–24.

Lehtosalo, M., Mäkelä, A. & Valkonen, S. 2011. Laikkumätästettyjen uudistusalojen
vesottuminen. Metsätieteen aikakauskirja 1/2011: 46-49.

Luonnonvarakeskuksen tilastotietokanta. [Verkkodokumentti]. Luonnonvarakeskus
2015. Saatavissa:
http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__02%20Rakenne%20ja%20tuotanto__12%20Metsanhoito-%20ja%20metsanparannustyot/01_Metsanhoito_ja_metsparant_tyomaar.px/chart/chartViewColumn/?rxid=dc711a9e-de6d-454b-82c2-74ff79a3a5e0. [Viitattu 13.11.2015]

Luoranen, J. & Kiljunen, N. 2006. Kuusen paakkutaimien viljelyopas.
Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoen yksikkö, Suonenjoki. 108 s s.

Luoranen, J., Saksa, T., Finer, L. & Tamminen, P. 2007. Metsämaan muokkausopas.
Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoen yksikkö, Suonenjoki. 75 s s.

Luoranen, J. & Viiri, H. 2012. Soil preparation reduces pine weevil (*Hylobius abietis* (L.)) damage on both peatland and mineral soil sites one year after planting. *Silva Fennica* 46(1): 151-161.

Luoranen, J., Saksa, T. & Uotila, K. 2012. Metsänuudistaminen. Metsäkustannus,
Helsinki. 150 s s.

Luoranen, J. Sianoja, M. & Poteri, M. 2014. Ennakkotuloksia: hyvä mätästys
suojaa taimia tukkimiehentäin tuhoilta ilman kemikaaleja. Metsäntutkimuslaitos
taimiuutiset 2/2014: 6-8

Mannerkoski, H. 1991. Maanmuokkauksen vaikutus maan vesi-, happi- ja
lämpötilouteen. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 383: 43–51.

Mohamedou, C., Tokola, T. & Eerikäinen, K. 2014. Applying airborne γ -ray and DEM-
derived attributes to the local improvement of the existing individual-tree growth model
for diameter increment. *Remote Sensing of Environment* 155: 248-256.

Miina, J. 2001. Kasvumallit. Julkaisussa: Laukkanen, S. & Maltamo, M. Metsää
kuvaavat mallit. Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta, Joensuu. s. 170-197.

Mäkitalo, K. & Heiskanen, J. 2001. Männynviljelyn onnistuminen ja siihen vaikuttavat
tekijät - tuloksia pitkäaikaisesta metsänviljelykokeesta Lapissa.
Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 803: 71–103.

- Mälkönen, E. 2001. Uudistusalan valmistus. Julkaisussa: Valkonen, S., Ruuska, J., Kolström, T., Kubin, E. & Saarinen, M. 2001. Onnistunut metsänuudistaminen. Metsälehti, Helsinki. s. 123-130.
- Mälkönen, E. 2003. Maan kunnostaminen metsän uudistamiseksi. Julkaisussa: Mälkönen, E., Derome, J., Heiskanen, J., Helmisaari, H., Huhta, V., Lehto, T. et al. Metsämaa ja sen hoito. Kustannusosakeyhtiö Metsälehti, Helsinki. s. 159-174.
- Nilsson, U., Gemmel, P. & Hällgren, J.-E. 1996. Competing vegetation effects on initial growth of planted *Picea abies*. New Zealand Journal of Forestry Science 26: 84-98.
- Nilsson, U. & Örlander, G. 1999. Water uptake by planted *Picea abies* in relation to competing field vegetation and seedling rooting depth on two grass-dominated sites in southern Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research 14: 312-319.
- Nordborg, F. 2001. Effects of site preparation on soil properties and on growth, damage and nitrogen uptake in planted seedlings. Acta Univ. Agr. Sueciae. Doctoral dissertation. Silvestria 195. 25 s.
- Nordlander, G., Bylund, H. & Björklund, N. 2005. Soil type and microtopography influencing feeding above and below ground by the pine weevil *Hylobius abietis*. Agricultural and Forest Entomology 7: 107-113.
- Nordlander, G., Hellqvist, C., Johansson, K. & Nordenhem, H. 2011. Regeneration of European boreal forests: Effectiveness of measures against seedling mortality caused by the pine weevil *Hylobius abietis*. Forest Ecology and Management 262: 2354-2363.
- Nygren, M. 2007. Metsänkasvatuksen lähtökohdat. Julkaisussa: Rantala, S. Metsäkoulu. 6. p. painos. Metsäkustannus, Helsinki. s. 9-34.
- Nygren, M. 2011. Metsänkylvöopas : Kylvön biologiaa ja tekniikkaa. Metsäntutkimuslaitos, Vantaa. 85 s s.
- Ojansuu, R. 1996. Kangasmaiden kasvupaikan kuvaus MELA-järjestelmässä. Julkaisussa: Hynynen, J. & Ojansuu, R (toim.). 1996. Puuston kehityksen ennustaminen – MELA ja vaihtoehtoja. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 612: 39–56.
- Paikkaoppi - Paikkatiedon avoin oppimisympäristö. 2016. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.paikkaoppi.fi/rasteri-ja-vektorimuotoinen-paikkatietoaineisto/>. [Viitattu 18.5.2016]
- Petráš, R. & Mecko, J. 2011. Effect of climatic factors on the dynamics of radial increments of Norway spruce, European beech and sessile oak. Journal of Forest Science 7: 293-302.
- Poteri, M. 2008. Havupuiden taimet suojataan taimitarhalla tukkimiehentäin tuhoilta. Metsäntutkimuslaitos taimiuutiset 1/2008: 10-11
- Ranta, E., Rita, H. & Kouki, J. 2002. Biometria: Tilastotiedettä ekologeille. Yliopistopaino, Helsinki. 569 s.

Rantala, J. 2016. Vs. Gradun alustava versio! Sähköpostiviesti tekijälle 4.8.2016.

Rantala, J. & Heiskanen, J. 2003. Mätästykseen ja jyrsinnän vaikutus kuusentaimien kasvuun ja kuolleisuuteen. Metsäntutkimuslaitos taimiuutiset 3/2003: 7-8

Remes, M. 2016. Syysistutus tasaa työvoiman tarvetta. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://metsaan-lehti.fi/fi/artikkeli/syysistutus-tasaa-tyovoiman-tarvetta>. [Viitattu 10.8.2016]

Repo, R. & Valtanen, J. 1994. Maan ominaisuudet metsänviljelyssä – mätästykseen perusteet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 520. 52 s.

Rikala, R. 2005. Ennaltamääräytynyt ja vapaa kasvu. Metsäntutkimuslaitos taimiuutiset 4/2005: 6

Rikala, R. 2010. Vapaa- ja ennaltamääräytynyt kasvu, jälkivaikutus ja kuusentaimien kasvurytmi. Metsäntutkimuslaitos taimiuutiset 2/2010: 5-7

Rikala, R. 2012. Metsäpuiden paakkutaimien kasvatusopas. Metsäntutkimuslaitos, Helsinki, Vantaa. 247 s s.

Saksa, T. 2011. Kuusen istutustaimien menestyminen ja tukkimiehentäin tuhot eri tavoin muokatuilla uudistusaloilla. Metsätieteen aikakauskirja 2/2011: 91-105.

Saksa, T. 2014. Muokkausmenetelmän valinta. Suometsien uudistaminen – seminaariesitys 3.12.2014 Seinäjoella. Saatavissa: <http://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/maanmuokkausmenetelman-valinta-metla-saksa.pdf>. [Viitattu: 27.1.2016]

Saksa, T. & Kankaanhuhta, V. 2007. Metsänuudistamisen laatu ja keskeisimmät kehittämiskohteet Etelä-Suomessa: Metsänuudistamisen laadun hallinta -hankkeen loppuraportti. Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoen yksikkö, Suonenjoki. 78, 12 s s.

Saksa, T., Heiskanen, J., Miina, J., Tuomola, J. & Kolström, T. 2005. Multilevel modelling of height growth in young Norway spruce plantations in southern Finland. Silva Fennica 39(1): 143–153.

Siipilehto, J. 2006. Linear prediction application for modelling the relationships between a large number of stand characteristics of norway spruce stands. Silva Fennica 40(3): 517-530.

Siipilehto, J. 2011. Local prediction of stand structure using linear prediction theory in Scots pine-dominated stands in Finland. Silva Fennica 45(4): 669–692.

Siipilehto, J. 2016. LUKEN kuusen pituusmalleja vertailuaineistoksi gradutyöhön! Sähköpostiviesti tekijälle 4.8.2016.

Siipilehto, J., Valkonen, S. & Päätaalo, M. 2015. Männyn- ja kuusentaimikoiden kehitys erilaisia metsänuudistamisketjuja käytettäessä. Metsätieteen aikakauskirja 1/2015: 5-21.

Soimasuo, J. 2015. Kääntömättäillä taimet hyvään kasvuun myös Venäjällä. Metsä Groupin Viesti- omistajajäsen- ja sidosryhmälehti 3/2015: 9

Tamminen, P. & Mälkönen, E. 2003. Metsämaiden viljavuus. Julkaisussa: Mälkönen, E., Derome, J., Heiskanen, J., Helmisaari, H., Huhta, V., Lehto, T. et al. Metsämaa ja sen hoito. Kustannusosakeyhtiö Metsälehti, Helsinki. s. 141-152.

Ununger, J., Ekberg, I., & Kang, H. 1988. Genetic control and age-related changes of juvenile growth characters in *Picea abies*. Scandinavian Journal of Forest Research 3: 55-66.

Uotila, K., Rantala, J., Saksa, T. & Harstela, P. 2010. Effect of soil preparation method on economic result of norway spruce regeneration chain. *Silva Fennica* 44(3): 511-524.

Uotila, A., Kasanen, R. & Heliövaara, K. 2015. Metsätuhot. Metsäkustannus, Helsinki. 206 s s.

Valkonen, S. 1997. Viljelykuusikon alkukehityksen malli. Metsätieteen aikakauskirja - Folia Forestalia 3/1997: 321–347.

Valkonen, S. 2000. Kuusen taimikon kasvattamisen vaihtoehdot Etelä-Suomen kivennäismailla: Puhdas kuusen viljelytaimikko, vapautettu alikasvos ja kuusi-koivusekataimikko. Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, Vantaa. 83, 92 s s.

Valkonen, S. 2001. Taimien kasvu. Julkaisussa: Valkonen, S., Ruuska, J., Kolström, T., Kubin, E. & Saarinen, M. 2001. Onnistunut metsänuudistaminen. Metsälehti, Helsinki. s. 109-117.

Valkonen, S. 2014. Puun kehitys. Julkaisussa: Huuskonen, S., Hynynen, J. & Valkonen, S. Metsänkasvatus: menetelmät ja kannattavuus. Metsäkustannus, Helsinki. s. 21-26

Valkonen, S., Ruuska, J., Kolström, T., Kubin, E. & Saarinen, M. 2001. Onnistunut metsänuudistaminen. Metsälehti, Helsinki. 217 s s.

VMI 11 Maastotyöohje. 2009. Metsäntutkimuslaitos. Saatavissa: <http://www.metla.fi/ohjelma/vmi/vmi11-maasto-ohje09-2p.pdf> . [Viitattu 9.8.2016]

Äijälä, O. 2014. Hyvän metsänhoidon suositukset: metsänhoito. Metsäkustannus, Helsinki. 264 s s.

Örlander, G. 1985. Plantetablering – en fråga om vattenupptagning. Sver. Lantbruksuniv. Skogsakta 28. 4 s.

Örlander, G. 1986. Effects of planting and scarification on the water relation in planted seedlings of Scots pine. *Studia Forestalia Suecica* 173. 17 s.

Örlander, G. & Nilsson, U. 1999. Effect of reforestation methods on pine weevil (*Hylobius abietis*) damage and seedling survival. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14: 341-354.

Örlander, G., Nilsson, U. & Hällgren, J.-E. 1996. Competition for water and nutrients between ground vegetation and planted *Picea abies*. *New Zealand Journal of Forestry Science* 26: 99-117.

Örlander, G., Hallsby, G., Gemmel, P. & Wilhelmsson, C. 1998. Inverting improves establishment of *Pinus contorta* and *Picea abies* - 10-year results from a site preparation trial in northern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13: 160-168

LIIKTEET

Liite 1: Kääntömätästyskuvioiden perustiedot (Metsä Group)

Tilaryhmä	Kuvio	Pinta-ala (ha)	Metsätyyppi	Maalaji	Istutusv.	Käänt.m.v.
10003	A024	2,3	MT	Hienoainesmoreeni	2005	2005
10003	A069	1,2	OMT	Hienoainesmoreeni	2005	2005
10003	A113	0,4	MT	Hienoainesmoreeni	2011	2010
10007	A039	4,1	OMT (korpi)	Turvemaa	2011	2011
10007	A070	2,8	VT	Hienoainesmoreeni	2007	2007
10007	B028	5,6	VT	Hienoainesmoreeni	2007	2007
10007	B034	2,7	OMT	Hienoainesmoreeni	2007	2007
10007	D057	2,9	OMT	Hienoainesmoreeni	2001	2001
10011	B002	13,4	MT	Hienojakoinen lajittunut maa-aines	2009	2009
10011	B005	1,6	MT	Hienojakoinen lajittunut maa-aines	2009	2009
10013	A008	6,2	MT (korpi)	Turvemaa	2013	2013
10013	A017	1,6	MT (korpi)	Turvemaa	2013	2013
10013	A019	0,4	MT	Hienoainesmoreeni	2013	2013
10013	A023	1	MT	Hienoainesmoreeni	2009	2009
10013	A024	1,1	VT	Kivinen hienojakoinen kangasmaa	2009	2008
10013	A037	2,1	MT	Hienoainesmoreeni	2013	2012
10014	A061	4,6	MT	Hienoainesmoreeni	2011	2010
10014	A073	0,5	MT	Hienosainesmoreeni	2011	2010
10014	A075	2,3	OMT	Hienoainesmoreeni	2011	2010
10017	A002	1	MT (korpi)	Turvemaa	2007	2007
10017	A004	3,5	OMT	Hienoainesmoreeni	2005	2004
10017	A008	7	MT	Hienoainesmoreeni	2003	2002
10017	A009B	0,6	OMT	Hienoainesmoreeni	2003	2002
10017	A015	0,6	OMT (korpi)	Turvemaa	2007	2007
10017	A021	1	OMT	Hienoainesmoreeni? (Metkiksessä turvemaa)	2003	2002
10017	A028	2,3	OMT	Hienoainesmoreeni	2003	2002
10017	A031	0,4	OMT (korpi)	Turvemaa	2007	2007
10017	A042	5,9	MT	Hienoainesmoreeni	2007	2007
10025	A006	4,5	MT	Hienojakoinen lajittunut maa-aines	2009	2009
10025	A007	0,5	MT	Hienojakoinen lajittunut maa-aines	2009	2009
10025	A022	2,3	OMT	Hienojakoinen lajittunut maa-aines	2009	2009
10027	A036	1,4	Lehto (korpi)	Turvemaa	2011	2011
10027	A037	1,8	MT (korpi)	Turvemaa	2011	2011
10305	B003	8,8	MT	Hienoainesmoreeni	2003	2002
10305	B014	1,4	MT	Hienoainesmoreeni	2003	2002
10305	B020	1,3	MT	Hienoainesmoreeni	2003	2002
10602	A031	6,8	MT	Karkea lajittunut maalaji	2005	2004
10604	B002	7,2	MT	Hienoainesmoreeni	2005	2004
10608	A011	2,3	MT	Hienoainesmoreeni	2001	2001
10609	A050	0,8	OMT	Hienoainesmoreeni	2013	2012
10609	A092	0,9	MT	Hienoainesmoreeni	2013	2012
10609	A097	1,1	MT	Hienoainesmoreeni	2013	2012
10618	C053	0,6	MT	Hienoainesmoreeni	2001	2000
10618	C054	6,1	MT (korpi)	Turvemaa	2001	2000
10644	A013	2,6	MT	Keskikarkea tai karkea kangasmaa	2005	2005
10644	A018	6,6	MT	Hienoainesmoreeni	2005	2005
10652	F015	1,9	OMT	Hienoainesmoreeni	2001	2000
10652	F019	3,4	MT	Hienoainesmoreeni	2001	2000
10652	F057	2,7	MT	Hienoainesmoreeni	2001	2000

Liite 2: Maastolomake

TAIMIKKO INVENTOINTI KÄÄNTÖMÄTÄSTYSKOYTEILLA										Inventoija	Jani Järvenpää		
										Inventointipäivä			
Kuviotiedot													
Kunta		Kuvio nro		Lämpösumma									
Maanmuok. V		Istutus. V		Kasvupaikka									
KP lisämääre		Taimien ikä		Käsittelyhistoria									
Maalaji		Taimilaji		Pinta-ala (ha)									
Koealamittaukset (ympyräkoeala, $r = 2,52 \text{ m}$)													
Maalaji=Hieno, keskikarkea, karkea, turve						Koealan keskipistettä lähimmän puun:							
Käsittely= Ei käsittelyä, Varhaisperkaus, Taimikonhoito						Pituus (m)							
Vpituus= Valtapituus (m)						Kantoläpimitta (cm)							
						Runkoluku (kpl/koeala)							
Mittattavat Suureet													
Id:t			Koeala			Istutus Kuusi				Luontaiset lehtipuut		Yht	Lisätietoja
Koeala	GPS_id	GPS_tark	Maalaji	Sois/Kiv	Käsittely	Pituus	Vpituus	Läpimitt	Runkol	Vpituus	Runkol	Runkolu	
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25													
26													
27													
28													
29													
30													
31													
32													
33													
34													
35													
36													
37													